



HAL
open science

Etude par télédétection de la dynamique du soja et de l'impact des précipitations sur les productions au Mato Grosso (Brésil)

Damien Arvor

► **To cite this version:**

Damien Arvor. Etude par télédétection de la dynamique du soja et de l'impact des précipitations sur les productions au Mato Grosso (Brésil). Sciences de l'Homme et Société. Université Rennes 2, 2009. Français. NNT: . tel-00422109v2

HAL Id: tel-00422109

<https://theses.hal.science/tel-00422109v2>

Submitted on 12 Nov 2009

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

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



THESE / UNIVERSITE RENNES 2 HAUTE-BRETAGNE
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE
Mention : Géographie
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par
Damien Arvor

Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554
Université Rennes 2 Haute-Bretagne
COSTEL LETG UMR 6554 CNRS FR/IFR CAREN

Etude par télédétection de la dynamique du soja et de l'impact des précipitations sur les productions au Mato Grosso (Brésil)

Thèse soutenue le 18 septembre 2009
devant le jury composé de :

Hervé Théry

Directeur de recherche CNRS, Professeur invité à l'Université de São Paulo / *rapporteur*

Sylvain Bigot

Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble / *rapporteur*

Yosio Edemir Shimabukuro

Chercheur titulaire du département de télédétection de l'INPE, São Jose dos Campos-SP /
examineur

Patricio Mendez del Villar

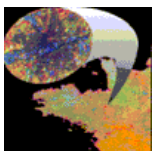
Chargé de recherche au CIRAD, Montpellier / *examineur*

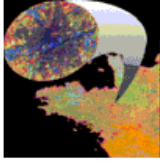
Margareth Simões Penello Meirelles

Professeur à l'Université de l'Etat de Rio de Janeiro, Chargée de recherche à l'Embrapa
Solos / *co-directrice de thèse*

Vincent DUBREUIL

Professeur à l'Université Rennes 2 / *directeur de thèse*





SOUS LE SCEAU DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

Université Rennes 2 Haute-Bretagne
Ecode Doctorale - Sciences Humaines et Sociales

Laboratoire COSTEL
LETG UMR 6554 FR/IFR CAREN

Discipline : **GEOGRAPHIE**

**Etude par télédétection de la dynamique du
soja et de l'impact des précipitations sur les
productions au Mato Grosso (Brésil)**

Thèse de Doctorat

Présentée par **Damien ARVOR**

Directeur de thèse : Vincent DUBREUIL

Co-directrice de thèse : Margareth Simões Penello MEIRELLES

Soutenue le 18 septembre 2009

Membres du jury :

Hervé Théry, Directeur de recherche CNRS, Professeur invité à l'Université de São Paulo / *rapporteur*

Sylvain Bigot, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble/ *rapporteur*

Yosio Edemir Shimabukuro, Chercheur titulaire du département de télédétection de l'INPE, São Jose dos Campos-SP/ *examineur*

Patricio Mendez del Villar, Chargé de recherche au CIRAD, Montpellier / *examineur*

Margareth Simões Penello Meirelles, Professeur à l'Université de l'Etat de Rio de Janeiro, Chargée de Recherche à l'Embrapa Solos / *co-directrice de thèse*

Vincent Dubreuil, Professeur à l'Université Rennes 2 / *directeur de thèse*

Remerciements

Au cours de cette thèse, j'ai été amené à travailler dans des cadres de recherche variés et enrichissants, que ce soit en France ou au Brésil. Cela m'a permis de rencontrer un grand nombre de personnes aux compétences diverses et aux histoires uniques. Toutes ces personnes m'ont aidé, soutenu et motivé à un moment de cette thèse (ou tout au long pour les plus courageux) et je tiens donc à les remercier.

Tout d'abord, je remercie mon directeur de thèse, Vincent Dubreuil, qui a su me convaincre et me motiver à travailler sur une thématique amazonienne. A mon arrivée au laboratoire COSTEL en 2004, mon intérêt était clairement tourné vers le Nordeste et il faut aussi le féliciter (parce que c'était pas gagné d'avance) de m'avoir convaincu à travailler sur le Mato Grosso. J'ai énormément apprécié sa rigueur au travail qui m'a permis de progresser de manière régulière. Il m'a surtout apporté un soutien sans faille, prodiguant de nombreux conseils judicieux et me faisant profiter de son expérience de chercheur au panel de compétences diversifié (climatologie, télédétection, Brésil).

J'ai aussi pu profiter du soutien sans faille de Margareth Meirelles de l'Embrapa Solos de Rio de Janeiro, co-directrice de cette thèse. Son enthousiasme, sa motivation et son courage pour mener de front tous les projets dont elle s'occupe sont une source de motivation constante. Margareth fait partie de ces gens rencontrés par hasard, au bout d'une chaîne de contact *Embrapense* qui m'a mené de Goiania à Brasilia en passant par Tangara da Serra et enfin Rio de Janeiro. Des gens que l'on souhaite rencontrer à tout prix alors qu'on ne les connaît pas et dont on se dit, avec le recul, qu'ils ont été indispensables à la réalisation de cette thèse. A ce titre, je remercie également Milton Jonathan, également de l'Embrapa Solos, qui a été un collègue idéal pour réaliser toute la partie de classification des images MODIS. Ses compétences en informatiques se sont avérées complémentaires des connaissances de terrain que j'avais acquises lors de mes missions au Mato Grosso.

Par l'entremise de mes deux directeurs de thèse, c'est en fait l'ensemble des personnes travaillant au laboratoire COSTEL de Rennes et à l'Embrapa Solos de Rio de Janeiro que je remercie. A Rennes, Hervé Quenol et Johan Oszwald m'ont apporté de précieux conseils et leurs corrections, notamment pour les parties 2 et 4, ont toujours été pertinentes. Je remercie aussi tous les (post-)doctorants (Soazig, Emilie, Janique, Rémi, Clémence, Cyril, Sébastien, Jonathan, Rahim, Mabiane, Guillaume, Adewi, Jeater, Romain, Andrea...), enseignants-personnels (Sam, Hervé, Olivier, Thomas, Laurence, Adeline, Robert, Jean-Pierre, Loïc, Mado, Tanguy...) et étudiants (Maxime, Pauline, Sandrine, Jeff, Florian, Aurélia...) qui m'ont toujours apporté leur soutien. Une mention particulière à Antoine, Jean, Vincent et Claire avec lesquels j'ai pu partager des moments qui dépassent largement le cadre professionnel. A Rio de Janeiro, Lucieta, Fernanda, Ricardo, Carlos, Thais, Yuri... ont largement facilité mon insertion dans la *Cidade Maravilhosa*.

Au détour de réunions, travaux de publications et participations à des colloques, j'ai également eu la chance de rencontrer de nombreux géographes dont l'aide m'a été précieuse : Laurent Durieux, Valérie Bonnardot, Carlos Magri Ferreira, Martine Droulers, François-Michel le Tourneau, Téléphore Brou, Patricio Mendez del Villar, Sylvain Bigot, Yosio Shimabukuro et Hervé Théry. J'en profite d'ailleurs pour remercier ces quatre derniers pour avoir accepté d'être membre du jury durant la soutenance de cette thèse.

Mes recherches m'ont aussi amené à effectuer de nombreuses enquêtes de terrain dans le cadre du projet ANR DURAMAZ. A ce titre, je tiens à remercier les membres du Clube dos Amigos da Terra de Sorriso (Lenira, Alfeo et Everaldo) pour leur accueil chaleureux et leur aide qui m'a permis de créer de nombreux contacts avec quelques producteurs matogrossenses qui m'ont toujours bien reçu (Nelson Piccoli, Darcy Ferrarin, Vittorio Cella, Luiz Augusto, Clovis, Rudimar Ceni, Grupo Amaggi, Sementes Bom Futuro, Grupo Vanguarda...). A Cuiaba, l'ICV (Instituto Centro Vida) m'a ouvert les portes de ses bureaux durant quelques journées (merci à Laurent Micol).

Un grand merci à ma famille, à qui ce fut un plaisir de faire découvrir le Brésil en 2007, et aux amis « **bretons** » (ils se reconnaîtront !), qui ont dû supporter de longues soirées à m'écouter parler du Brésil et du soja, « **troyens** » (Fred, Nora, Florian,...) et « **brésiliens** » (Gizelle, Gugu, Alice, Jonathan, Lidiane, Renata, Rodrigo, Mércia, Melissa...) pour m'avoir tous hébergé et surtout fait découvrir leur pays. Des remerciements tout particulier à la famille Vargas (Doutora Regina) de Cuiaba et surtout à Rafaela qui m'a accompagné de longs mois sur le terrain et m'a été d'une aide et d'un soutien inestimable.

Enfin, cette thèse a un coût et je souhaite donc remercier les organismes qui m'ont financé au cours de cette thèse : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Projet ANR DURAMAZ (coordonné par Martine Droulers, et François-Michel Le Tourneau), le CIES Grand Ouest (Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur) et la région Bretagne.

Participations à des programmes de recherche

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés dans le cadre de programmes de recherche français et brésiliens :

1. ***DURAMAZ : « Les déterminants géographiques, démographiques et socio-économiques de la durabilité en Amazonie brésilienne »***. Projet ANR-06-BLAN-0176 financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).
2. ***“Tecnologias avançadas em processamento digital de imagens para o monitoramento automatizado do desflorestamento, degradação da terra e da expansão do sistema plantio direto através da classificação sistemática do uso e da cobertura do solo”***. Projet soutenu par le CNPq, via l'appel à coopération internationale CNPq/INRIA, edital 05/2005, projet Enviair, contrat 490089/2005-4.
3. ***“Land use change in the Rio de la Plata basin : Assess impacts, and support viable strategies for the future”***. Projet partiellement financé par le IAI (Inter-American Institute for Global Change Research ; CRN II 2031), soutenu par la US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).
4. ***“Landuse change, biofuels and rural development in the La Plata Basin”***. Projet partiellement financé par le IAI (Inter-American Institute for Global Change Research ; # 104358) soutenu par le International Development Research Centre (IDRC).

Sommaire.....	7
<i>Résumé/Abstract/Resumo.....</i>	<i>9</i>
Introduction générale.....	11
Partie 1 : La culture du soja en Amazonie, un facteur d'expansion et d'intensification agricole.....	19
Introduction de la Partie 1.....	20
Chapitre 1. Entre développement et préservation : les enjeux nationaux et internationaux de la mise en valeur de l'Amazonie.....	21
Chapitre 2. Les fronts pionniers amazoniens : une spécificité matogrossense ?.....	47
Chapitre 3. L'intensification agricole : de la « Révolution Verte » à l'intensification écologique.....	65
Chapitre 4. Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso : l'exemple de Sorriso.....	79
Synthèse de la Partie 1.....	110
Partie 2 : Apport de la télédétection à moyenne résolution pour le suivi de la dynamique spatiotemporelle du soja	113
Introduction de la Partie 2.....	114
Chapitre 5. Les études d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie.....	115
Chapitre 6. Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation.....	143
Chapitre 7. Application de la méthodologie pour la cartographie des surfaces agricoles au Mato Grosso	163
Synthèse de la Partie 2.....	208
Partie 3 : Le soja au cœur de la dynamique du front pionnier matogrossense.....	211
Introduction de la Partie 3.....	212
Chapitre 8. Données et méthodes pour la cartographie du front pionnier.....	213
Chapitre 9. Cartographie des fronts d'ouverture, économique et d'intensification...	239
Chapitre 10. La dynamique du front pionnier.....	265
Synthèse de la Partie 3.....	284
Partie 4 : Climat et soja : le rôle des précipitations sur les dynamiques spatiales et les productions agricoles du soja.....	287
Introduction de la Partie 4.....	288
Chapitre 11. Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso.....	289
Chapitre 12. La pluviométrie et l'agriculture au Mato Grosso.....	313
Synthèse de la Partie 4.....	348
Conclusion générale.....	351
Références bibliographiques.....	359
<i>Liste des figures.....</i>	<i>381</i>
<i>Liste des tableaux.....</i>	<i>385</i>
<i>Table des matières.....</i>	<i>387</i>

Résumé : Depuis 2000, le Mato Grosso est devenu le premier Etat producteur de soja du Brésil. Cette évolution est le résultat de la progression d'un front pionnier qui a apporté un développement socio-économique indéniable, mais a entraîné une déforestation intense. Cette thèse vise à définir l'état des interactions climat / société au Mato Grosso en déterminant le rôle de la dynamique du soja en tant que moteur du front pionnier et en évaluant comment les précipitations sont un facteur guidant l'évolution des territoires du soja. Ces dynamiques sont étudiées à partir de classifications de séries temporelles de données satellitaires MODIS TERRA/EVI. Les résultats indiquent que l'expansion agricole entre 2000 et 2007 explique 12% de la déforestation au Mato Grosso ; 71% des nouvelles cultures de soja au Mato Grosso ont été semées sur des parcelles anciennement défrichées. Actuellement, le secteur agricole semble rentrer dans une nouvelle phase de développement axée sur l'intensification agricole : 46% de l'augmentation de la production agricole est due à des changements de pratiques culturales. Ceci est la conséquence de l'adoption de systèmes de production en double cultures commerciales qui concernent 30% des surfaces agricoles en 2007 (contre 6% en 2000). Ces changements sont affectés par une forte variabilité spatiale qui est notamment liée aux conditions pluviométriques (cumul annuel, début, fin et durée de la saison des pluies). Celles-ci sont déterminées à partir des estimations de précipitations des produits TRMM 3B42. Les résultats démontrent que les régions les plus intensives sont celles où la saison des pluies est la plus longue et où le volume précipité est le plus important.

Mots clés : Mato Grosso, soja, MODIS, TRMM, front pionnier, Amazonie, déforestation, saison des pluies.

Abstract: Since 2000, Mato Grosso became the first soybean producer State in Brazil. This evolution is the result of the progression of a pioneer frontier, which brought about undeniable positive socio-economic development but also high deforestation rates. The objective of this PhD is to contribute to a better knowledge of the interactions climate / society in Mato Grosso. More precisely, this work aims at determining the role of soybean dynamic as a driving force of the pioneer frontier, as well as evaluating the way rainfalls acts on the evolution of soybean territories. The analysis of these dynamics is carried out using classifications of temporal series of MODIS TERRA/EVI remotely sensed data. Our results indicate that the soybean agricultural expansion between 2000 and 2007 explains 12 % of the deforestation in Mato Grosso. In addition, 71 % of newly cultivated soybean fields in Mato Grosso are sowed in formerly deforested areas. Another important observation is that the agricultural sector is now initiating a new stage of development based on agricultural intensification: 46 % of the increase of agricultural production was obtained through changes in agricultural management practices. This is the consequence of the adoption of double cropping systems, which concern 30 % of the cultivated area in 2007 (against 6 % in 2000). We also show that agricultural intensification is affected by a strong spatial variability linked to the rainy season characteristics (annual rainfall, onset, end and duration of the rainy season). Those were computed using precipitation estimates from remotely sensed TRMM 3B42 products. Our results demonstrate a narrow relationship between intense rainy seasons and agricultural intensification.

Keywords: Mato Grosso, soybean, MODIS, TRMM, pioneer frontier, Amazonia, deforestation, rainy season.

Resumo : Desde 2000, o Mato Grosso transformou-se no maior Estado produtor de soja do Brasil. Essa evolução é a consequência do avanço de uma frente pioneira que trouxe um desenvolvimento socioeconômico certo, mas também resultou em altas taxas de desmatamento. Esta tese procura definir as interações clima / sociedade no Mato Grosso estudando o papel da dinâmica da soja como ator essencial da frente pioneira, além de avaliar a maneira pela qual as condições pluviométricas representam um fator importante, afetando a evolução dos territórios da soja. Essas dinâmicas são estudadas a partir de classificações de séries temporais de dados do sensor MODIS /EVI. Os resultados indicam que a expansão agrícola entre 2000 e 2007 explica 12% do desmatamento no Mato Grosso ; 71% das novas áreas de soja no Estado foram plantadas em talhões previamente desmatados. Atualmente, o setor agrícola matogrossense parece iniciar uma nova fase do seu desenvolvimento baseada na intensificação agrícola : 46% do aumento da produção agrícola é devido a mudanças nas práticas culturais. Isso é consequência da adoção generalizada dos sistemas safra-safrinha que representaram 30% das áreas agrícolas em 2007 (contra 6% em 2000). Essas mudanças são afetadas por uma forte variabilidade espacial relacionada as condições pluviométricas (acúmulo anual de chuva, início, fim e duração da estação chuvosa), determinadas a partir das estimativas de precipitações dos produtos TRMM 3B42. Os resultados demonstram que as regiões caracterizadas por uma agricultura mais intensiva, são aquelas onde a estação chuvosa é a mais intensa, em volume e em duração.

Palavras-chave : Mato Grosso, soja, MODIS, TRMM, frente pioneira, Amazônia, desmatamento, estação chuvosa.

Introduction générale

Contexte de l'étude

L'Amazonie est un des derniers espaces du globe dominé par la végétation primaire. Cependant, un processus de développement et d'intégration de l'Amazonie au territoire national est en cours. Cette intégration se traduit par des transformations radicales de l'espace et des paysages amazoniens. L'arrivée de nombreux migrants sur des terres à faible densité de population a permis un développement économique indéniable, mais dont les conséquences sociales et surtout environnementales sont préoccupantes.

L'Etat du Mato Grosso, au sud du bassin amazonien (fig. 0.1), illustre parfaitement cette évolution. Depuis les années 1970, le développement économique y a été soutenu par une forte croissance agricole. Les surfaces semées en soja ont notamment augmenté, de 1,5 millions d'hectares en 1990 à 6 millions d'hectares en 2005, faisant de cet Etat le « grenier » du Brésil. L'activité agricole a été développée par des producteurs originaires du Sud, attirés dans cette région dans le cadre de projets de colonisation privés incités par les pouvoirs publics. Ces colons ont alors su adapter leurs connaissances agricoles aux conditions tropicales du Mato Grosso. A la même époque, de nombreux migrants, notamment nordestins, sont venus s'installer au Mato Grosso pour profiter du boom économique lié à l'expansion du soja. De la sorte, les nouvelles populations du Sud et du Nordeste sont venues compléter la mosaïque sociale du Mato Grosso où cohabitaient déjà populations indigènes et populations traditionnelles matogrossenses (Droulers, 2001 ; Théry, 2005). Les enjeux sociaux liés à cette phase de colonisation sont donc importants. A l'échelle nationale, il s'agit de réduire les inégalités en offrant une possibilité de développement dans les nouvelles régions en essor pour les classes les plus démunies. A l'échelle régionale, il s'agit de s'assurer que le développement socio-économique d'une classe sociale ne porte pas atteinte au développement des autres populations. L'impact de l'avancée du soja sur les modes de vie des populations indigènes est par exemple régulièrement mis en question (Laurance *et al.*, 2001 ; Fearnside, 2005a ; Hecht, 2005 ; Nepstad *et al.*, 2006a).

Outre l'aspect socio-économique, les impacts environnementaux liés au développement agricole au Mato Grosso sont régulièrement dénoncés (Laurance *et al.*, 2001 ; Fearnside, 2002 ; Fearnside, 2005a). Pour de nombreux auteurs, l'expansion du soja est un facteur majeur de la déforestation de l'Amazonie et des *cerrados*¹ (Fearnside, 2002 ; Bertrand *et al.*, 2004 ; Cardille et Foley, 2003 ; Morton *et al.*, 2006 ; Nepstad *et al.*, 2006a). Cette affirmation est en partie confirmée par le fait que le Mato Grosso, premier producteur de soja, est également l'Etat du Brésil où la déforestation est la plus importante (38% de la déforestation en Amazonie entre 1988 et 2007 selon l'INPE²). Par ailleurs, la culture intensive du soja, très demandeuse en intrants, est un facteur de pollution des sols et des ressources en eau.

Les impacts environnementaux de la colonisation et de l'expansion agricole sont donc conséquents. Une remise en question du modèle de développement prôné depuis 30 ans est nécessaire pour assurer un avenir durable à cette région. Il s'agit alors de maintenir un taux de croissance socio-économique élevé tout en limitant les impacts environnementaux. Une telle

¹ Savane arborée du Brésil.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2007.htm

évolution passe nécessairement par une meilleure compréhension des interactions nature / société. L'étude de ces interactions constitue l'axe de recherche scientifique principal de cette thèse.

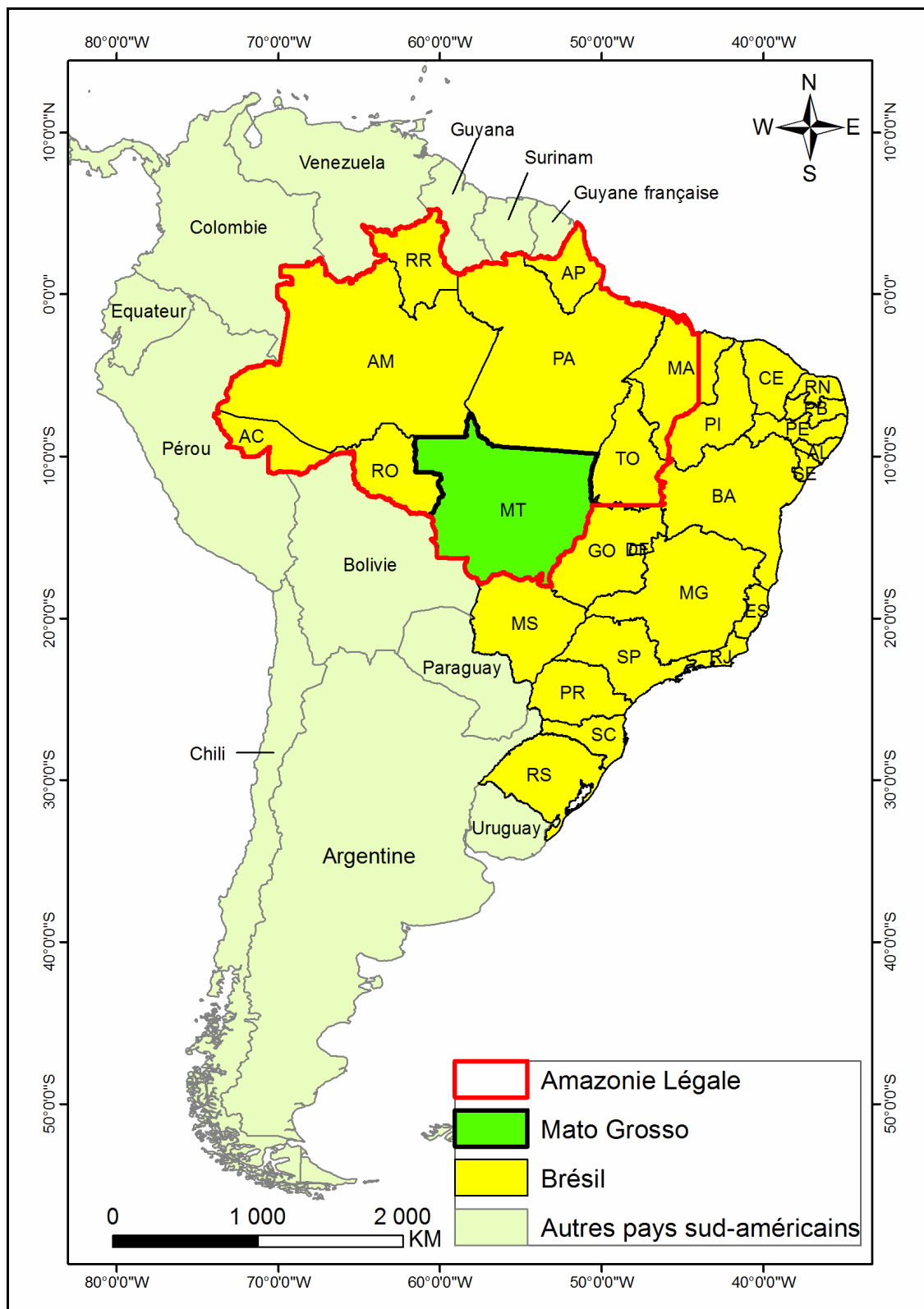


Figure 0.1 : Localisation du Mato Grosso en Amérique du Sud, au Brésil et en Amazonie.

Objectifs scientifiques

Les enjeux environnementaux de l'expansion agricole étant d'échelle globale (changement climatique, perte de biodiversité), la communauté internationale s'intéresse aujourd'hui de près aux mutations territoriales en cours en Amazonie. Les chercheurs ont notamment un rôle essentiel à jouer dans la détection et la compréhension des causes et des conséquences des changements observés dans la région. La majorité des travaux scientifiques portant sur l'Amazonie s'intègre dans un cadre d'étude des interactions entre nature et société. Les recherches sur cette thématique s'organisent autour de deux axes de recherche principaux (fig. 0.2). Le premier axe, le plus étudié, a pour objectif d'évaluer les conséquences du développement des sociétés sur l'environnement. Il s'agit de déterminer les impacts directs (déforestation, pollution, ...) et indirects (changement climatique résultant de la déforestation, perte de biodiversité...) des activités anthropiques sur l'environnement. Le deuxième axe de recherche vise à comprendre comment les sociétés s'adaptent au milieu naturel dans lequel elles vivent.

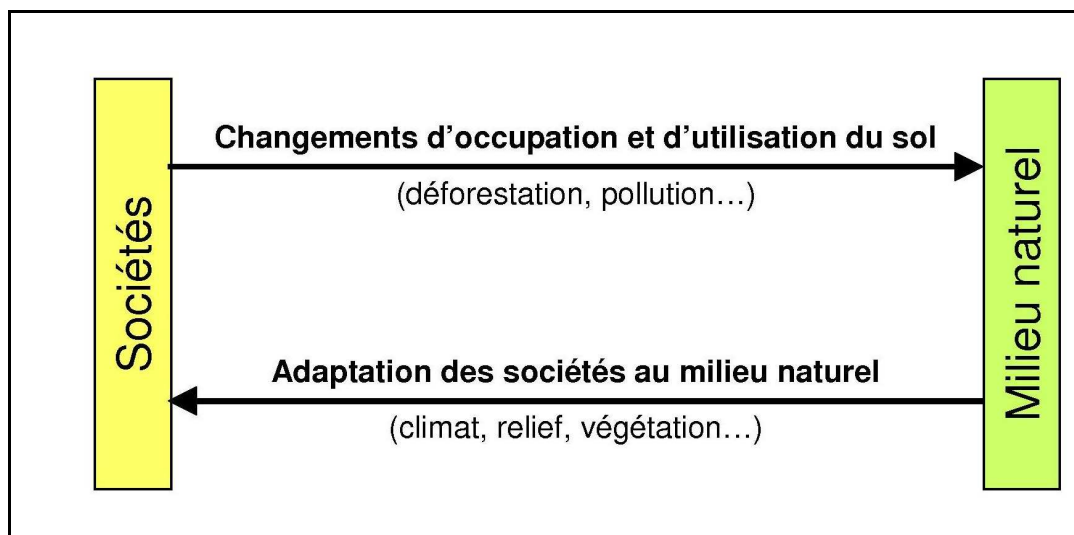


Figure 0.2 : Présentation des interactions nature / société.

A partir de ces deux axes de recherche synthétiques, trois thématiques de recherche se distinguent. La première thématique consiste à qualifier et quantifier l'état des relations nature / société et leur évolution : l'estimation de l'étendue de la déforestation en Amazonie en est l'exemple type (Achard *et al.*, 2002 ; Laurance *et al.*, 2001 ; Fearnside, 2005a). La deuxième thématique est basée sur la compréhension des processus de changements. C'est donc une recherche plus systémique qui intègre notamment les travaux de modélisation ayant pour but de prévoir les changements à court, moyen ou long terme. Enfin, la troisième thématique est une recherche de propositions visant à améliorer l'adaptabilité des sociétés à leur milieu naturel. C'est par exemple grâce à la recherche que le soja a pu être cultivé dans le *cerrado* matogrossense et que les producteurs ont été convaincus d'adopter des pratiques culturales plus productives et plus respectueuses de l'environnement.

La diversité des thématiques de recherche autour de la question des relations nature / société implique la mobilisation de disciplines scientifiques variées (agronomie, climatologie, informatique, sociologie...). La géographie a un rôle central à jouer puisqu'elle permet de spatialiser les dynamiques observées. Pour ce faire, les géographes peuvent notamment s'appuyer sur la maîtrise des techniques de télédétection qui sont efficaces pour le

suivi des changements d'occupation et d'utilisation du sol (Lambin *et al.*, 2001 ; Coppin *et al.*, 2004 ; projet LUCC¹ dans le cadre de IGBP/IHDP²).

L'objectif de cette thèse de géographie est d'étudier, à partir de données satellitaires, le rôle de la dynamique du soja dans les relations nature / société au Mato Grosso. En fonction des axes de recherche présentés auparavant, il s'agit d'une part d'analyser l'impact de l'expansion des cultures de soja sur l'environnement et, d'autre part, de déterminer de quelle manière les producteurs s'adaptent au milieu naturel et notamment au climat.

Le climat est un facteur essentiel à prendre en compte pour le développement de toute activité agricole. La culture du soja a par exemple été rendue possible par la recherche qui a su adapter de nouvelles variétés aux conditions climatiques régionales (Bertrand *et al.*, 2004). Cependant, en milieu tropical, les précipitations caractérisées par une forte variabilité spatiotemporelle constituent une contrainte majeure au développement de toute activité agricole (Bigot *et al.*, 2005 ; Dubreuil, 2005 ; Santos, 2005). Malgré cela, les producteurs continuent aujourd'hui d'améliorer leurs modes de production en tirant profit au maximum des possibilités offertes par le climat subéquatorial du Mato Grosso (Santos, 2005). Par exemple, de nombreux producteurs réalisent aujourd'hui deux récoltes par an, ce qui représente un signe d'intensification agricole.

Le climat est donc un élément déterminant de la dynamique du soja au Mato Grosso puisque l'adaptation des sojiculteurs aux précipitations a favorisé l'expansion agricole et l'intensification agricole. Or, la dynamique du soja affecte l'environnement, notamment en tant que vecteur de déforestation. La déforestation est une conséquence directe et indirecte de l'expansion des cultures de soja. Elle est directe lorsque les parcelles défrichées sont rapidement converties en culture. Elle est indirecte lorsque l'expansion agricole favorise la ségrégation sociale forçant certaines populations à migrer et à défricher dans d'autres localités. De la sorte, la dynamique du soja ne peut être analysée indépendamment des autres dynamiques spatiales en jeu au Mato Grosso (élevage, agriculture traditionnelle...). L'agriculture mécanisée doit donc être considérée comme un acteur essentiel de la progression du front pionnier amazonien dont l'évolution mène à une dégradation écologique (Coy, 1996).

Consciente de ces problèmes, la société cherche aujourd'hui à faire évoluer le modèle de développement vers plus de durabilité. L'intensification agricole prônée aujourd'hui par les instituts de recherche régionaux vise ainsi à améliorer les pratiques culturelles pour mieux protéger les services écosystémiques. Le niveau d'adoption de ces nouvelles techniques agricoles par les producteurs représente un indicateur de l'évolution des territoires agricoles vers une phase de stabilité marquant la fin de l'ère pionnière. Cette ultime phase doit tendre vers une situation d'équilibre dans les relations nature / société dans laquelle les services fournis par la nature sont valorisés par les efforts de protection réalisés par la société.

Dans cette thèse, nous abordons l'analyse des relations nature / société par une étude approfondie des changements d'occupation du sol et de l'évolution des pratiques agricoles. Le premier objectif de ce travail vise à définir comment les dynamiques du soja impactent l'environnement et comment elles peuvent être expliquées par les conditions pluviométriques.

¹ LUCC = Land Use and Land Cover Change

² IGBP = International Geosphere-Biosphere Program ; IHDP = International Human Dimensions Program on Global Environmental Change

Dans cette perspective, la télédétection est un outil adéquat pour le suivi de l'évolution spatiotemporelle de telles dynamiques. En effet, les données disponibles sur le terrain (données climatiques et statistiques agricoles), peu denses et peu fiables, ne permettent pas de suivre les changements rapides et spatialement étendus. A l'échelle régionale, les images satellites issues du capteur MODIS TERRA offrent des perspectives encourageantes pour répondre aux problématiques posées. La résolution spatiale (250 m) et temporelle (1 à 2 jours) de ces images permet de suivre l'évolution phénologique des couverts végétaux (Huete *et al.*, 2002 ; Shimabukuro *et al.*, 2005). Ces suivis fournissent alors des informations essentielles pour la cartographie des changements d'occupation et d'utilisation du sol qui peuvent être croisées avec des données de précipitations. Sur ce dernier point, la télédétection ouvre également des possibilités intéressantes. Les estimations de précipitations issues des produits TRMM 3B42, de par leur résolution spatiale (0,25°) et temporelle (3 h), sont un complément à l'utilisation des stations au sol qui peut s'avérer intéressante à l'échelle régionale.

L'évaluation de l'apport des données satellitaires MODIS TERRA/EVI et TRMM 3B42 pour l'observation et la compréhension des changements d'occupation et d'utilisation du sol et leur lien avec la pluviométrie au Mato Grosso constitue donc le deuxième objectif de cette thèse.

Afin de répondre à ces objectifs, cette thèse est organisée en quatre parties distinctes (fig. 0.3) :

La première partie présente le contexte de la thèse. Elle intègre une approche multiscale nécessaire à la compréhension des phénomènes observés. Dans un premier temps, il s'agit de présenter les enjeux environnementaux globaux liés aux changements d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie. Ceux-ci sont expliqués par des processus d'intégration du territoire répondant à des règles d'échelles nationale ou régionale. La notion de front pionnier est ainsi introduite. Enfin, les enjeux et les processus de l'occupation sont illustrés à l'échelle locale à partir de l'étude de l'évolution d'un territoire agricole basé sur la culture du soja. La commune de Sorriso, plus grande commune productrice de soja du Brésil, est prise en exemple.

La deuxième partie présente l'apport des techniques de télédétection pour l'analyse des relations nature / société. Nous présentons une synthèse bibliographique sur l'utilisation des images satellitaires pour l'observation des changements d'occupation et d'utilisation du sol, notamment pour le suivi de la déforestation et la cartographie des cultures. Nous introduisons ensuite les données MODIS TERRA/EVI utilisées dans cette thèse. Enfin, nous présentons et validons la méthode de traitement des images MODIS choisie pour cartographier les cultures de soja.

Dans la troisième partie, les cartes d'occupation et d'utilisation du sol issues des données satellitaires sont employées pour analyser la dynamique du soja. Il s'agit de quantifier l'impact de l'expansion agricole sur la déforestation et de démontrer qu'il existe une tendance à l'intensification agricole. L'objectif est de proposer une cartographie de la progression du front pionnier en prenant en compte les différentes étapes qui le composent.

Enfin, le but de la quatrième partie est d'analyser le mode d'adaptation des producteurs au climat régional. Après avoir validé l'emploi des produits d'estimations des précipitations TRMM 3B42, les conditions pluviométriques sont considérées comme un

facteur déterminant pour la compréhension du mode de développement de la filière agricole au Mato Grosso. Nous émettons en effet l'hypothèse que l'intensité et la durée de la saison des pluies influent sur l'adoption de pratiques culturales intensives. Par ailleurs, la variabilité spatiotemporelle des conditions pluviométriques est considérée comme un facteur de vulnérabilité pour les producteurs de soja.

Cadre de l'étude

Cette thèse a été réalisée au laboratoire COSTEL (Climat et Occupation du Sol par Télédétection) de l'Université de Rennes 2. En outre, trois séjours au Brésil de six mois ont été effectués afin de collecter des données sur le terrain et de développer des liens avec des institutions scientifiques brésiliennes. Dans ce cadre, une partie de la thèse a été réalisée dans les locaux de l'EMBRAPA Solos à Rio de Janeiro. Par ailleurs, ce travail s'intègre dans le cadre du programme de recherche international DURAMAZ, financé par l'Agence Nationale de la Recherche, visant à analyser les déterminants géographiques, démographiques et socio-économiques de la durabilité en Amazonie brésilienne¹.

¹ <http://www.iheal.univ-paris3.fr/spip.php?rubrique361>

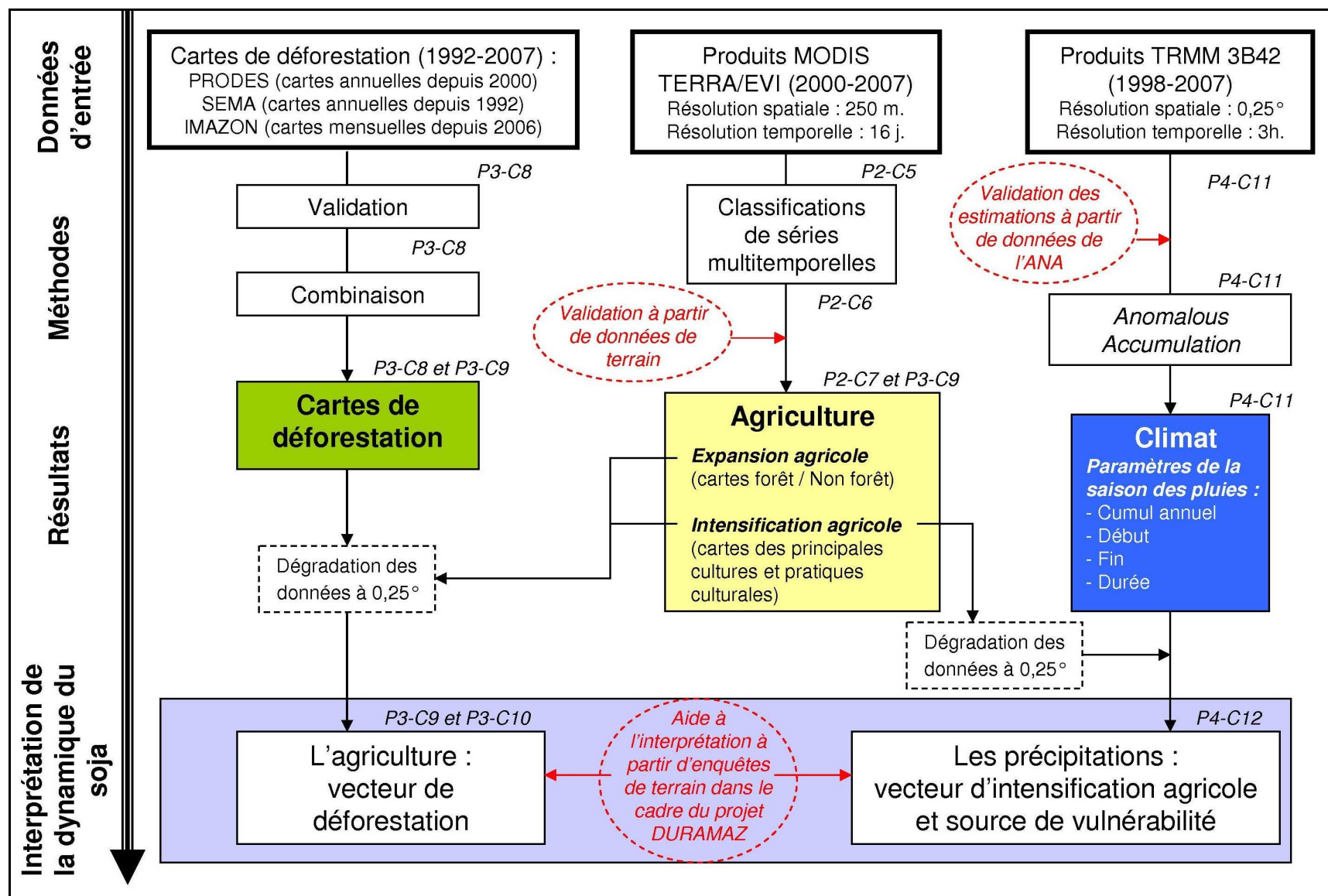


Figure 0.3 : Présentation de l'organigramme de la thèse (P3-C8 = Partie 3-Chapitre 8)



Photographie de l'avenue principale de Lucas do Rio Verde (2005) montrant l'importance de la filière agricole du soja au Mato Grosso. L'entreprise Amaggi est une entreprise de production, transformation et exportation de soja fondée par André Maggi, père de l'actuel gouverneur du Mato Grosso, Blairo Maggi. © DA-2009

Partie 1 : La culture du soja en Amazonie, un facteur d'expansion et d'intensification agricole

Introduction de la Partie 1

Chapitre 1. Entre développement et préservation : les enjeux nationaux et internationaux de la mise en valeur de l'Amazonie

Chapitre 2. Les fronts pionniers amazoniens : une spécificité matogrossense ?

Chapitre 3. L'intensification agricole : de la « Révolution Verte » à l'intensification écologique

Chapitre 4. Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso : l'exemple de Sorriso

Synthèse de la Partie 1

Introduction de la Partie 1

A l'époque du cycle de l'or au 18^{ème} siècle, la capitale du Mato Grosso, Cuiaba, était la troisième plus grande ville du pays. Cependant, cet Etat ne s'est réellement développé qu'au 20^{ème} siècle au cours duquel il a été intégré au territoire national, notamment à travers le développement de l'activité agricole basée sur la culture du soja. L'objectif de cette première partie de thèse est de présenter le front pionnier résultant de ce processus d'intégration. Il s'agit (i) de définir quelles en sont les causes et les conséquences et (ii) de comprendre comment s'organise ce processus, i.e. de déterminer comment progresse un front pionnier en Amazonie et plus particulièrement au Mato Grosso. Pour cela, il convient surtout de mettre en avant le rôle moteur de la dynamique du soja dans l'évolution du front pionnier matogrossense.

Dans le premier chapitre, les raisons socio-économiques et géopolitiques qui ont poussé les gouvernements brésiliens à occuper l'Amazonie à partir des années 1930 sont rappelées. De par sa localisation géographique à la limite entre les biomes de *cerrado* et de forêt, le Mato Grosso a été un des premiers Etats concernés par ces nouvelles politiques d'occupation. Les mutations territoriales qui y ont eu lieu ont donc été considérables, amenant un développement économique et social indéniable. Toutefois, ce développement a également entraîné une forte déforestation dont il convient de présenter les principales conséquences environnementales (perte de biodiversité, perturbation des cycles de l'eau et du carbone). Pour lutter contre ce problème, les nouvelles politiques d'occupation de l'Amazonie doivent aujourd'hui prendre en compte la composante environnementale dans les modes d'aménagement. Nous présentons donc les moyens d'actions mis en place aux échelles nationales et internationales pour préserver l'Amazonie.

Les mutations en cours au Mato Grosso sont le signal de la progression d'un front pionnier. Le second chapitre de cette partie propose une approche géographique de ces mutations en revenant sur les définitions des fronts pionniers amazoniens. Il s'agit pour cela de comprendre la dynamique spatiotemporelle du front en déterminant les étapes de son évolution et les modes d'organisation spatiale correspondants.

L'agriculture est souvent la principale activité au sein d'un front pionnier. C'est notamment le cas au Mato Grosso où la culture du soja prédomine. Les étapes de progression du front correspondent donc en partie à des changements repérés au sein de l'espace agricole. Ces changements ont souvent pour but d'augmenter la production afin d'améliorer la rentabilité de la filière agricole. L'intensification agricole est donc considérée comme la dernière étape de l'avancée du front pionnier agricole. Le troisième chapitre introduit de manière détaillée cette notion d'intensification agricole en présentant notamment comment celle-ci a évolué au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle pour préconiser des pratiques plus respectueuses de l'environnement.

Enfin, le quatrième chapitre de cette partie développe les observations tirées dans les trois premiers chapitres à partir d'un exemple concret appliqué à un territoire de production de soja : la commune de Sorriso au centre du Mato Grosso. Ce chapitre présente ainsi comment la filière agricole du soja s'y est installée et a évolué depuis les années 1970-80.

Chapitre 1. Entre développement et préservation : les enjeux nationaux et internationaux de la mise en valeur de l'Amazonie

1. Introduction

L'Amazonie est considérée comme un espace à part dans le territoire brésilien. Cette région est restée très longtemps inconnue des Brésiliens, qui la considèrent à la fois comme attirante et repoussante. Sa conquête s'est organisée tout au long du 20^{ème} siècle, au gré des cycles économiques et des décisions politiques. Ainsi, 27,8 millions de brésiliens habitent dans les régions Nord et Centre-Ouest en 2007, contre 2,8 millions en 1940. L'installation aussi rapide d'une telle population est le résultat de projets successifs de colonisation instaurés par les gouvernements cherchant à résoudre les problèmes socio-économiques et géopolitiques du Brésil : inégalité, pauvreté et sécurité du territoire national. Cependant, un tel changement a entraîné de graves conséquences pour l'environnement. L'Amazonie est aujourd'hui la région du monde la plus affectée par la déforestation en valeur absolue : 19000 km² en moyenne/an entre 1992 et 2005 (INPE, 2008). Ce phénomène a attiré l'attention de la communauté internationale sur cette région longtemps ignorée. Aujourd'hui, les dirigeants brésiliens doivent donc relever un nouveau défi qui consiste à assurer le développement régional tout en préservant l'Amazonie, considérée comme un des derniers territoires naturels de la planète.

Dans un premier temps, ce chapitre présente le processus de colonisation de l'Amazonie mis en place depuis les années 1930. Les principaux enjeux environnementaux découlant de la déforestation conséquente de cette colonisation sont ensuite décrits. Enfin, il convient d'introduire les actions mises en place aux échelles locale, nationale et internationale pour répondre à ces enjeux.

2. L'intégration de l'Amazonie au territoire national : une réponse à des enjeux socio-économiques et géopolitiques

Pour les gouvernements qui se sont succédés au cours du 20^{ème} siècle, qu'ils soient démocratiques ou autoritaires, les enjeux de l'occupation de l'Amazonie sont socio-économiques. Il s'agit d'intégrer cette région au territoire national pour maintenir la croissance et réduire les conflits existants dans les régions de colonisation plus ancienne. En outre, l'occupation de l'Amazonie représente un enjeu géopolitique car elle permet d'affirmer la présence de l'Etat sur son territoire alors que des volontés d'internationalisation de la région ont émergé dans les années 1940. Ainsi, la conquête de l'Amazonie a surtout été organisée par trois régimes politiques qui se sont succédés des années 1930 aux années 1980 : (i) un régime populiste et dictatorial entre 1930 et 1945 ; (ii) un régime démocratique à la politique « développementiste » entre 1946 et 1964 et (iii) un régime militaire autoritaire entre 1964 et 1984 (Droulers, 2001).

2.1. 1930-1945 : la marche vers l'Ouest

Au début du 20^{ème} siècle, les régions Nord et Centre-Ouest du Brésil sont simplement peuplées par les populations indigènes et quelques villages isolés de *caboclos* le long des

cours d'eau (Théry, 2006). Ces derniers se sont installés au cours des différents « booms » économiques (bois, caoutchouc, or et élevage) qui ont permis d'initier la conquête de l'Amazonie (Summers, 2008). On parle alors « d'Amazonie des fleuves ». Ce n'est qu'à partir des années 1930-1940 que l'Etat commence à organiser la conquête de cet espace encore méconnu.

Deux facteurs vont déclencher la mise en place de cette nouvelle politique de manière concrète (Droulers et Le Tourneau, 2000) : (i) pour subvenir à leurs besoins en période de guerre, les Etats-Unis aident l'Etat brésilien à développer la production de caoutchouc en Amazonie ; et (ii) le président Vargas (1934-1945 et 1951-1954) souhaite assurer la souveraineté nationale en Amazonie. Celui-ci lance alors la « Marche vers l'Ouest » en 1937 qui prévoit un renforcement des liens avec la Bolivie, la création de quatre territoires fédéraux¹ pour affirmer la présence de l'Etat dans la région, la création de la ville de Goiania (1932) et les premières colonisations agricoles dans le *cerrado* : des projets sont implantés dans les Etats de Goiás, Mato Grosso du Sud et Paraná (Droulers, 2001 ; Nedélec, 2005).

2.2. 1946-1964 : un nouveau statut pour l'Amazonie

Avec le retour à un régime démocratique après 1945, la conquête de l'Amazonie se poursuit sous l'égide de la SPVEA² créée en 1946 dont l'objectif est de : « promouvoir l'intérêt du capital privé dans l'exploitation des richesses nationales, y compris au travers d'entreprises de capital mixte » (Bergamasco et Carmo, 1996). Cette administration reçoit 3% des revenus fiscaux du pays pour assurer le développement en Amazonie Légale (Droulers, 2001). Cette région délimitée en 1953 est composée de neuf Etats³ (fig. 1.1) dont il s'agit d'assurer le développement en améliorant les connexions avec le reste du pays et en lui attribuant des conditions attrayantes (incitations fiscales notamment).

Cette politique est renforcée sous le mandat du président Kubitschek (1956-1961) qui souhaite « faire avancer le pays de cinquante ans en cinq ans » (Summers, 2008). La politique « développementiste » prônée à l'époque cherche à donner une nouvelle direction à l'économie vers l'intérieur du pays plutôt que vers l'extérieur (Droulers, 2001). Cela se traduit par la création de la capitale Brasília (1960) dans le Centre-Ouest et l'ouverture de routes reliant cette capitale à Belem (en 1960) et à l'Etat de l'Acre (1964). Cependant, cette politique n'est pas du goût de tous puisqu'elle augmente l'inflation et la dette extérieure (Droulers, 2001) et réduit le pouvoir des grands propriétaires fonciers en accordant des droits aux travailleurs ruraux (Théry, 2005). Le gouvernement démocratique est alors renversé par les militaires (1964) qui vont gouverner pendant 21 ans.

¹ Les territoires de Guaporé (Rondonia), Acre (fondée en 1904), Rio Branco (Roraima) et Amapá.

² Superintendance pour la mise en valeur de l'Amazonie

³ L'Amazonie légale est composée des Etats de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Maranhão (ouest du 44° méridien), Pará, Rondonia, Roraima et Tocantins.

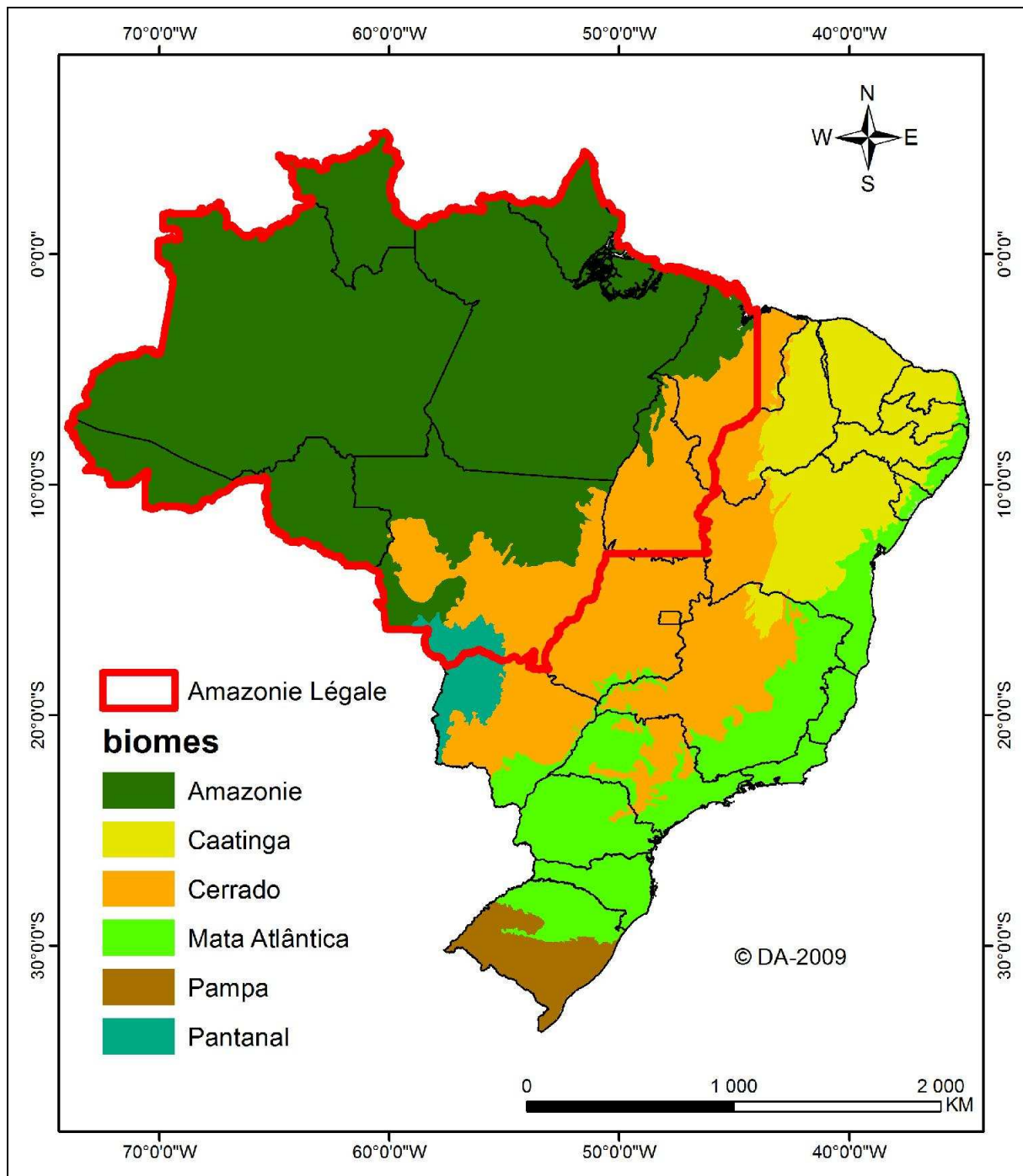


Figure 1.1 : Carte de végétation du Brésil avec les limites de l'Amazonie Légale (*source : Ministerio de Transportes*).

2.3. 1964-1984 : les militaires organisent l'occupation de l'Amazonie

Le gouvernement militaire poursuit le processus de colonisation de l'Amazonie. Quatre périodes de développement se distinguent, alternant les incitations dirigées vers les petits colons et les grands propriétaires.

Entre 1966 et 1970, l'Opération Amazonie lancée par le Général Castelo Branco (1964-1967) vise à continuer l'industrialisation du pays et à attirer les colons capitalisés en

Amazonie. La SUDAM¹ (1966) et la SUDECO² (1967) sont chargées de coordonner ce développement en (i) améliorant et créant les infrastructures nécessaires au développement économique en Amazonie et (ii) en offrant des conditions fiscales et des subventions aux entreprises investissant dans la région (Summers, 2008). La Banque de l'Amazonie (BASA) est également fondée en 1966 pour assurer la réalisation de ces actions.

A la fin des années 1960, la modernisation de l'agriculture brésilienne et les sécheresses au Nordeste accentuent les tensions sociales dans les régions rurales. Pour réduire ces tensions, le président Medici (1969-1974) débute une réforme agraire dans le cadre d'un Plan d'Intégration Nationale (PIN) dont les slogans « *integrar para não entregar* »³ et « *uma terra sem homems par homems sem terra* »⁴ résumant parfaitement les enjeux géopolitiques et sociaux qui ont incité à la colonisation de l'Amazonie. La conquête est toujours coordonnée par la SUDAM et la SUDECO qui doivent à présent orienter leurs actions vers : (i) la construction de routes, (ii) la colonisation agricole et (iii) l'urbanisation (Droulers, 2001 ; Théry, 2005).

Après la création de la première route Brasilia-Belem (1960) qui permet pour la première fois de relier le nord et le sud du Brésil autrement que par la mer, l'effort est porté sur la création de routes transamazoniennes. La Transamazonienne (BR-230) est d'abord achevée en 1972 et permet de relier le Nordeste à l'Amazonie (Etats du Para et Amazonas). A la même époque, les militaires entreprennent l'ouverture de la BR-163 (1972) de Cuiaba à Santarem qui traverse l'Amazonie dans le sens Nord-Sud, de la BR-364 reliant l'Etat de São Paulo à l'Acre et la route BR-319 (Porto Velho – Manaus – Boa Vista). Cependant, ces constructions ayant été beaucoup plus coûteuses que le budget initialement prévu (400 millions de dollars pour la transamazonienne au lieu de 30 millions), les autres projets de construction de nouvelles routes prévues sont reportés (Théry, 2005).

Les routes créées servent de base pour le début de la colonisation agricole en Amazonie. L'« Amazonie des routes » se substitue donc à l'« Amazonie des fleuves » (Arnauld de Sartre, 2003). Fuyant les inégalités rencontrées dans leurs régions d'origines, les colons nordestins se dirigent surtout vers la Transamazonienne tandis que ceux du sud s'orientent majoritairement vers le Rondônia. La réforme agraire qui est lancée a donc deux objectifs annoncés : assurer l'occupation de l'Amazonie et réduire les tensions dans les régions traditionnelles. Pour organiser cette conquête, l'Etat crée l'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire) qui est chargé d'installer plus de 500000 familles sur une bande de 100 km de part et d'autre de cette route (Droulers, 1995) et dans le territoire fédéral du Rondônia dans le cadre du programme PROTERRA⁵ (1971). Pour ce faire, l'INCRA redistribue aux migrants des lots de 100 ha sur des terres publiques (*terras devolutas*) et leur fournit les outils nécessaires au démarrage d'une activité agricole, six mois de salaire et un titre provisoire de propriété (Droulers, 1995).

Cependant, le plan de colonisation publique n'atteint pas ses objectifs car (i) la répartition des lots au sein des *assentamentos* (lotissements de colonisation) n'est pas suffisamment réfléchi, (ii) les colons ne connaissent pas assez bien le milieu amazonien pour être productifs, et (iii) les produits ne sont pas écoulés car il n'existe pas de marchés locaux

¹ Superintendance pour le Développement de l'Amazonie

² Superintendance pour le Développement du Centre-Ouest

³ Intégrer pour ne pas brader

⁴ Une terre sans hommes pour des hommes sans terre

⁵ Programme de Redistribution des Terres et de Stimulation à l'agro-industrie du Nord et du Nordeste

(Théry, 2005). « La colonisation publique de grande ampleur, conçue pour le petit paysan, est virtuellement abandonnée au milieu des années 1970 » (Droulers, 1995). L'Etat arrête d'aider les agriculteurs familiaux et ouvre l'Amazonie aux capitaux privés.

L'ouverture de la région aux capitaux est l'œuvre du second PIN lancé par le nouveau président Geisel (1974-1979). Alors que le premier PIN a surtout permis d'ouvrir des axes de développement du territoire, le second PIN vise à assurer la présence brésilienne en créant des pôles de développement. Les projets POLOAMAZONIA¹ et POLOCENTRO sont lancés pour encadrer ces pôles de développement en Amazonie et au Centre-Ouest, respectivement. Ces projets sont orientés vers les activités minières et agricoles destinées à l'exportation afin de financer le processus de modernisation et d'industrialisation du pays. De grandes infrastructures comme les barrages hydroélectriques sont également projetées. La création de ces pôles est rendue possible par les aides politiques accordées à la région amazonienne se traduisant par des créations de nouvelles routes, des octrois de crédits à faible taux, des incitations fiscales² et des subventions. Tous ces avantages économiques sont gérés par la BASA (Banque de l'Amazonie) (Droulers, 1995). Les efforts consentis par l'Etat forment les mécanismes encourageant l'installation de l'entreprise agricole capitaliste (Becker, 1986). Cela permet aux entreprises privées de colonisation du Sud du Brésil d'acheter des terres en Amazonie pour attirer des petits producteurs capitalisés. Ce mode de colonisation se développe particulièrement bien au Mato Grosso.

En même temps que l'Etat encourage l'installation de colons capitalisés, la migration spontanée de petits producteurs se poursuit (Nédélec, 2005). Pour tenter d'organiser cette nouvelle arrivée de population, l'Etat lance en 1981 le projet POLONOROESTE³ qui prévoit notamment la colonisation du Rondônia et de l'ouest du Mato Grosso ainsi que l'asphaltage de la route BR-364 (Cuiaba-Porto Velho) avec un tiers des financements de la Banque Mondiale (Nédélec, 2005 ; Summers, 2008). Par ailleurs, devant les coûts prohibitifs de la colonisation publique, l'INCRA s'associe à des coopératives du sud du pays pour initier un nouveau mode de colonisation privé/public (Nédélec, 2005 ; Jepson, 2006). Ce mode de colonisation mixte destiné aux producteurs capitalisés du sud est surtout implanté au Mato Grosso à travers les PAC (*Projetos de Assentamentos Conjuntos*) le long de la BR-163 (Nédélec, 2005).

Le système de colonisation public, privé ou mixte mis en place par le gouvernement fédéral a également été repris à l'échelle de l'Etat par le gouvernement du Mato Grosso. Celui-ci a créé 27 colonies destinées à accueillir les petits colons du Sud et du Nordeste et a vendu de vastes lots de terrain (jusque 10 000 ha) à des propriétaires terriens. Enfin, il a aussi vendu 23 lots de 100 000 à 200 000 ha à des sociétés de colonisation dont le but était d'inciter des familles du sud à s'installer au Mato Grosso (Nédélec, 2005).

2.4. 1985-2009 : la régionalisation de l'Amazonie

Après le départ des militaires en 1984, les gouvernements démocratiques incitent l'INCRA à poursuivre la colonisation de l'Amazonie en se basant sur des projets plus petits (parcelles de 50 ha par famille contre 100 ha auparavant). Ce processus se maintient dans les années 1990 même si les créations d'*assentamentos* sont finalement interdites en forêt

¹ Programme de Pôles Agro-pastoraux et Agro-miniers en Amazonie

² 50% des sommes dues au titre de l'impôt sur le revenu pouvaient être investies en Amazonie Légale (Théry, 2005).

³ Programme de Pôles Agro-pastoraux et Agro-miniers au Nord-Ouest

amazonienne. L'INCRA ne se contente alors plus que de régulariser les migrants installés spontanément, notamment dans le cadre des revendications du « mouvement des sans terre » installé le long des routes et sur les grands domaines privés (De Mello et Théry, 2003 ; Nédélec, 2005). Les colons spontanés sont de plus en plus nombreux puisque les gouvernements successifs continuent d'apporter leur soutien à la croissance économique et à la conquête de l'espace en Amazonie. Les derniers programmes pluriannuels (*Brasil em Ação*, 1996-1999 ; *Avança Brasil*, 2000-2003 ; *Brasil de todos*, 2004-2007 ; *Plano Pluriannual*, 2008-2011) continuent d'améliorer les infrastructures de transport en bitumant des routes déjà existantes (l'asphaltage de la route BR-163 entre Cuiaba et Santarem fait notamment débat) et en développant des voies de transport multimodales¹ (PPA 2008-2011, 2007). En fait, alors que les politiques des années 1970-1980 visaient à intégrer l'Amazonie au territoire national, l'enjeu de ce début de 21^e siècle est de l'intégrer au territoire continental en améliorant les axes de communication avec les pays frontaliers (PPA 2008-2001, 2007).

Avec le poids fort donné à la colonisation privée, la logique géopolitique cède le pas aux logiques économiques (Arnauld de Sartre ; 2003 ; Jepson, 2006). Les différences sociales se forgent car, en attirant les grands producteurs capitalistes, l'Etat a favorisé la construction d'une société inégalitaire telle qu'elle l'était déjà dans les régions de provenance des colons. Selon Droulers (1995) : « les programmes de colonisation sont toujours présentés comme une solution assez autoritaire aux conflits agraires du pays mais il s'agit en fait d'une transposition : les fronts de colonisation sont les réceptacles des tensions agraires existant dans les autres régions du pays et deviennent par là même de nouvelles zones de conflits, à l'échelle amazonienne cette fois ». En fait, la colonisation a même empiré la situation puisque les nouveaux colons (petits ou grands producteurs agricoles et les grandes sociétés minières ou énergétiques) fondateurs de « l'Amazonie des routes » entrent en compétition avec les habitants au mode de vie traditionnel de « l'Amazonie des fleuves » (*seringueiros*, indiens) pour partager un espace commun (Arnauld de Sartre, 2003). De plus, se superposant à ces deux Amazonies opposées, la colonisation incitée par l'Etat a favorisé la création d'une « Amazonie des villes » (Becker, 1986) accueillant de nombreux colons en situation d'échec ainsi que les grands producteurs (ceux-ci sont souvent absents de leurs propriétés, préférant habiter dans les villes). Les villes sont alors marquées par de fortes ségrégations sociales comme à Sorriso (Mato Grosso) par exemple, où le quartier nordestin est séparé du quartier « sudiste » par la BR-163.

Finalement, l'action de l'Etat au cours de cette période de colonisation a entraîné une régionalisation (Droulers et Le Tourneau, 2000) et donc une nouvelle géographie de l'Amazonie brésilienne (Becker, 2001). Celle-ci comprend (fig. 1.2) : (i) une région occidentale pour le moment épargnée par l'avancée du front de par son isolement ; (ii) une région centrale préservée mais rendue vulnérable par les nombreux projets de développement d'infrastructures qui y sont prévus, et (iii) l'Amazonie méridionale (à forte colonisation privée) et orientale (à colonisation publique dominante) qui représente la région la plus peuplée et qui correspond à l'arc de déforestation (Becker, 1986 ; Becker, 2001).

Cette dernière région est celle qui attire le plus les attentions car le mode de conquête de l'espace adopté par les nouveaux colons y est beaucoup plus prédateur pour l'environnement que celui des populations traditionnelles. Notamment, les nouvelles technologies de défrichement apportées par les colons capitalisés sont redoutables : 40 ha peuvent être défrichés en une journée par 5 personnes à l'aide de chaînes tractées par des

¹ Il n'y a aujourd'hui que 14000 km de voies fluviales en opération sur les 42000 km de fleuves navigables au Brésil (PPA 2008-2011, 2007).

bulldozers (Droulers, 2004). Ainsi, les enjeux environnementaux liés à l'intégration territoriale d'une région aussi grande en aussi peu de temps doivent être évalués.

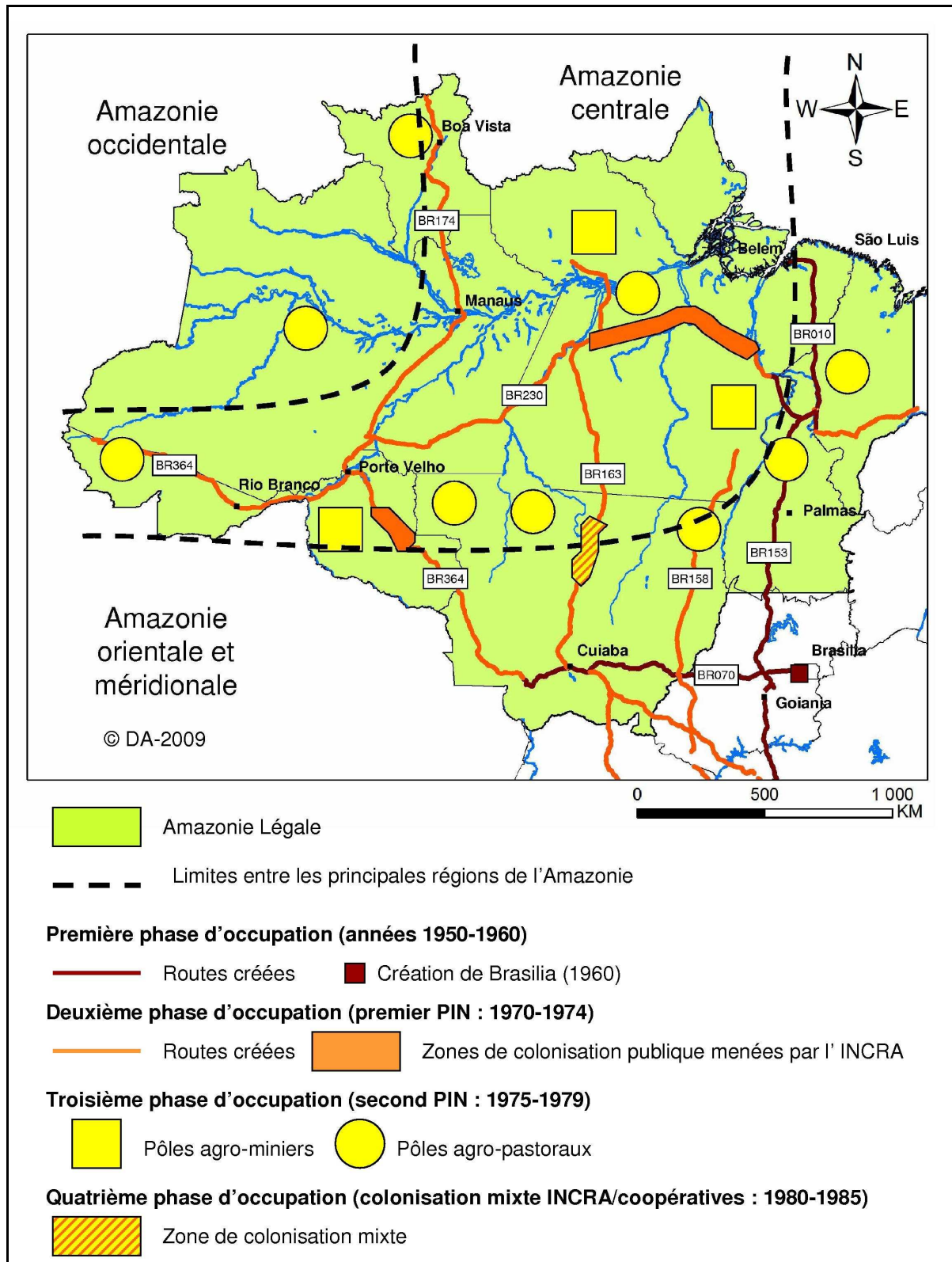


Figure 1.2 : Phases d'occupation de l'Amazonie menée par les gouvernements fédéraux entre 1950 et 1989 (D'après Droulers, 2001 et De Mello et Théry, 2003).

3. L'occupation de l'Amazonie et ses enjeux environnementaux

Les chiffres de la déforestation (21050 km² de forêt défrichée en moyenne par an entre 1977 et 1988 en Amazonie Légale) publiés par l'INPE¹ à la fin des années 1980 permettent à la population civile de se rendre compte de l'ampleur du phénomène. Or, à cette époque, la dimension environnementale prend de l'importance suite à la montée du discours écologiste dans les négociations internationales et dans l'opinion publique brésilienne. Le sommet de la Terre de Rio de Janeiro (1992) symbolise ce changement et incite le gouvernement brésilien à s'engager à mieux considérer l'aspect environnemental dans sa planification du développement en Amazonie. Pour cela, il décide notamment de coordonner des programmes de recherche internationaux (LBA, PROBEM, SIVAM/SIPAM)² dont le but est d'aider à mieux connaître l'écosystème Amazonien (Becker, 2001 ; De Mello et Théry, 2003). Ces projets ont notamment permis d'améliorer les connaissances scientifiques sur l'importance du milieu amazonien pour l'équilibre environnemental mondial³. Le bassin amazonien est notamment reconnu pour (i) sa riche biodiversité, (ii) son rôle de régulateur du cycle du carbone et (iii) son rôle dans le cycle de l'eau (Fearnside, 1997a).

3.1. La biodiversité

3.1.1. L'Amazonie et les *cerrados* : des biomes à protéger

La biodiversité (ou diversité biologique) se réfère à la variabilité de la vie sur Terre (Fearnside, 1999). L'intérêt de la biodiversité réside dans les nombreux services environnementaux qu'elle fournit : production de biomasse, contrôle du ruissellement, régénération des sols, contrôle des maladies, fixation du carbone et de l'azote... (Béné et Doyen, 2008). Elle représente également un intérêt économique pour la société à travers les produits qui sont exploités (« extractivisme » : fruits, hevea, bois) et ceux à exploiter (découverte de nouveaux fruits à commercialiser, intérêt pour la médecine, la cosmétique...) : Fearnside, 1999.

La biodiversité peut se mesurer selon deux critères principaux : (i) le nombre total d'espèces et (ii) le nombre d'espèces endémiques (Boom, 2002). A l'heure actuelle, 1,75 million d'espèces sont recensées sur Terre mais on estime qu'il en existerait 13,6 millions (Boom, 2002). Préserver la biodiversité au Brésil, et notamment en Amazonie, représente un enjeu vital car ce pays est reconnu comme un « pays de mégadiversité » par le WWF (World Wild Foundation). Il contiendrait effectivement un sixième de la biodiversité mondiale (Myers *et al.*, 2000). Lors d'une étude de la biodiversité au Brésil menée par le Ministère de l'Environnement en 1997, près de 200 000 espèces ont été recensées (Lewinsohn et Prado, 2005). Cependant, ce même rapport précise que de nombreuses espèces restent inconnues. La diversité totale au Brésil serait en fait estimée à 2 millions d'espèces. Par ailleurs, si la biodiversité de la forêt atlantique est bien connue, celle du *cerrado* et de l'Amazonie l'est beaucoup moins. Des estimations sont tout de même présentées dans le tableau 1.1 pour ces deux biomes.

¹ Institut National de Recherches Spatiales

² LBA = Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in the Amazon; PROBEM = Brazilian Program on Molecular Ecology of the Amazonian Biodiversity; SIPAM/SIVAM Project – protection and vigilance over the Amazon.

³ A ce titre, le Brésil est considéré comme un pays du E8, i.e. un des 8 poids lourds de l'environnement (Droulers, 2001)

		Cerrado (Myers et al., 2000)	Amazonie (Mittermeier et al., 2003)
Plantes	Total	10000	40000
	Endémiques	4400	30000
Oiseaux	Total	837	1300
	Endémiques	29	263
Mammifères	Total	161	425
	Endémiques	19	172
Reptiles	Total	120	371
	Endémiques	24	260
Amphibiens	Total	150	427
	Endémiques	45	366
Total vertébrés	Total	1268	2523
	Endémiques	117	1061

Tableau 1.1 : Nombre d'espèces totales et endémiques de plantes et de vertébrés en Amazonie et dans le cerrado.

Les invertébrés ne sont pas pris en considération mais ils représentent la plus grande part de la biodiversité comme l'illustrent les travaux de Erwin repris par Fearnside (1999). Erwin a trouvé 1080 espèces de scarabées (coléoptères) dans quatre types de forêts près de Manaus avec seulement 1% d'espèces en commun avec celles trouvées dans un autre site forestier distant de 70 kilomètres.

Tous les biomes du monde n'hébergent pas une diversité biologique équivalente (Sechrest *et al.*, 2002). Myers *et al.* (2000) ont donc proposé des critères permettant de déterminer les biomes à préserver en priorité. Ceux-ci sont présentés comme étant des « *hotspots* » définis selon deux critères. Les biomes doivent contenir plus de 0,5% des espèces de plantes du globe et être menacés de disparition (plus de 70% de la végétation primitive doit déjà avoir été défrichée). Outre le nombre absolu d'espèces, la biodiversité de ces *hotspots* présente aussi l'intérêt de représenter 2,6 milliards d'années d'histoire de l'évolution (Sechrest *et al.*, 2002). Deux biomes brésiliens sont référencés parmi les 25 *hotspots* pour la biodiversité dans le monde : la forêt atlantique et le *cerrado* (Myers *et al.*, 2000). Par contre, la forêt amazonienne n'est pas considérée comme un *hotspot* car elle a conservé plus de 30% de sa superficie originelle et sa biodiversité est encore trop méconnue. Elle est cependant catégorisée comme « *wilderness area* » et doit, à ce titre, faire l'objet d'une stratégie de conservation efficace. Les *wilderness areas* sont définies comme étant des espaces contenant un nombre élevé d'espèces, disposant de plus de 70% de leur végétation primaire originelle et de moins de 5 habitants/km² (Mittermeier *et al.*, 2003). Les zones humides du Pantanal sont également considérées comme une *wilderness area* (Mittermeier *et al.*, 2003).

3.1.2. Impact de la déforestation sur la biodiversité

La perte de biodiversité due à la déforestation se fait directement ou indirectement :

- Directement, les actes de déforestation peuvent mener à l'extinction d'essences végétales ou animales. Il existe une relation entre le nombre d'espèces et l'évolution de la superficie d'un biome indiquant que lorsque cette dernière diminue, la biodiversité diminue également (Pimm *et al.*, 1995 ; Pimm et Raven, 2000). En conséquence, les régions

caractérisées par un fort endémisme et des forts taux de déforestation sont les plus vulnérables (Fearnside, 2005a).

- Indirectement, l'impact de la déforestation sur la biodiversité dépend de différents facteurs tels que l'utilisation du sol suivant le déboisement, la fragmentation des espaces naturels, l'augmentation de la présence humaine, le changement climatique induit par la déforestation (Fearnside, 1999 ; Nobre *et al.*, 1991; Durieux *et al.*, 2003).

3.2. Le cycle du carbone

3.2.1. L'Amazonie : puits ou source de carbone ?

Le cycle du carbone se base sur les échanges de carbone organique ou inorganique aux interfaces atmosphère – biosphère – lithosphère - hydrosphère. Les échanges de carbone inorganique entre la biosphère et l'atmosphère se font par photosynthèse (absorption de carbone par la biomasse végétale) et respiration (émission de carbone par les êtres vivants). Le carbone absorbé par la végétation devient organique et est incorporé dans le sol par la décomposition de matière vivante. Ce carbone peut alors intégrer la lithosphère à travers la fossilisation et la sédimentation, regagner l'atmosphère par l'action des décomposeurs (micro-organismes tels que des bactéries ou champignons qui décomposent le carbone organique du sol) ou atteindre l'hydrosphère après érosion des sols. L'hydrosphère échange également directement du carbone avec l'atmosphère. Les océans absorbent une partie du carbone présent dans l'atmosphère, ce qui régule la concentration en CO₂ de l'atmosphère mais a le désavantage d'acidifier les eaux (ce cycle est résumé en figure 1.4).

Selon Ometto *et al.* (2005), la végétation amazonienne contient 70 Pg de carbone (1 Pg = 10¹⁵ g), soit 10 à 15% de la biomasse totale terrestre. Cette quantité correspond à 283 ± 66 tonnes par hectare de biomasse végétale. En ajoutant la biomasse morte et enterrée, la biomasse en Amazonie peut atteindre 537 tonnes par hectare (Ometto *et al.*, 2005). Les forêts tropicales, et notamment la forêt amazonienne, jouent donc un rôle majeur dans la régulation du cycle global du carbone à travers les échanges existants entre atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère. Il s'agit alors de comprendre ces échanges et de déterminer si l'Amazonie joue un rôle de source ou de puits de carbone (Nobre, 2002).

Le potentiel de séquestration du carbone par les couverts forestiers peut être mesuré en calculant la différence entre les quantités de carbone absorbées par la photosynthèse et les quantités de carbone respirées (par respiration autotrophique des végétaux et respiration hétérotrophique des décomposeurs du sol). Deux méthodes de calcul sont utilisées et donnent des résultats différents. Les méthodes « *Top-Down* » mesurent les concentrations en O₂ et CO₂ dans l'atmosphère pour répartir les puits de carbone entre terre et océan. Les méthodes « *Bottom-Up* » estiment les sources et puits de carbone à partir d'inventaires des forêts et des changements d'occupation du sol (Houghton, 2003). Ces deux méthodes donnent des résultats très différents puisque, à l'échelle planétaire, les méthodes « *Top-Down* » indiquent que la biosphère agirait comme un puits de carbone (0,8 Pg C an⁻¹) tandis que les méthodes « *Bottom-Up* » détectent une source de carbone (2,2 Pg C an⁻¹) (Houghton, 2003). Il existe donc de fortes incertitudes sur les transferts de carbone.

Dans le cas des forêts tropicales, la capacité de séquestration du carbone est estimée à 2 Pg C an⁻¹ pour l'ensemble des forêts tropicales vierges du globe, soit 1,1 tonne C ha⁻¹ an⁻¹ (Malhi et Grace, 2000). Ces résultats sont compatibles avec ceux de Nobre (2002) qui évalue

la capacité de séquestration de carbone entre 0,8 et 1,5 tonnes C ha⁻¹ an⁻¹. Les forêts tropicales américaines absorberaient à elles seules 1,14 Pg C an⁻¹, soit 57% du total absorbé. L'Amazonie, avec ses 5 millions de km², représenterait 0,55 Pg C an⁻¹. Cependant, ces valeurs déterminées à partir de moyennes faites à échelle globale sont soumises à deux sources d'incertitude : la variabilité des couverts forestiers et la variabilité climatique interannuelle.

Premièrement, les estimations ne prennent pas bien en compte la variabilité des échanges propres à chaque type de forêt. Par exemple, dans un cas précis de forêt à Manaus, le potentiel de séquestration approche les 6 tonnes C ha⁻¹ an⁻¹ (30,4 tonnes C ha⁻¹ an⁻¹ absorbées contre 24,5 tonnes C ha⁻¹ an⁻¹ émises) (Malhi et Grace, 2000), ce qui est donc bien plus que les 1,1 tonne C ha⁻¹ an⁻¹ calculés à l'échelle du bassin. Pour cette raison, Fearnside (1997b) prend en compte dans son étude 28 formations végétales différentes allant de la forêt ombrophile dense au *cerrado*.

Deuxièmement, les estimations tiennent peu compte de la variabilité climatique interannuelle. Cette variabilité existe à l'échelle planétaire où il a été démontré que les flux de carbone terrestre peuvent être positifs (source de carbone) ou négatifs (puits de carbone) selon les années (Schimel *et al.*, 2001) (fig. 1.3). En Amazonie, Tian *et al.* (1998) ont prouvé que le potentiel de séquestration de carbone de la forêt est influencé par les épisodes ENSO (El Niño Southern Oscillation). Ceux-ci entraînant des hausses de températures et des baisses de précipitations qui font baisser l'humidité du sol. Ainsi, la respiration autotrophe (respiration de la biomasse végétale) et hétérotrophe (respiration de la matière vivante du sol) augmente, faisant baisser le bilan de captation de carbone à l'échelle du bassin. En conséquence, lors d'événements El Niño forts, la forêt se transformerait en source d'émission de carbone tandis que les épisodes La Niña seraient liés à une plus grande quantité de carbone absorbée par la forêt. Il existe donc une forte variabilité dans la capacité d'absorption du carbone par les forêts. L'Amazonie pourrait en fait absorber entre 3 et -0,75 Pg C an⁻¹ (Ometto *et al.*, 2005), se transformant donc en source de carbone dans certaines conditions. Tian *et al.* (1998) précisent tout de même que, malgré ces oscillations, la tendance sur une période de 15 ans est à la séquestration de carbone à un taux de 0,2 Pg C an⁻¹.

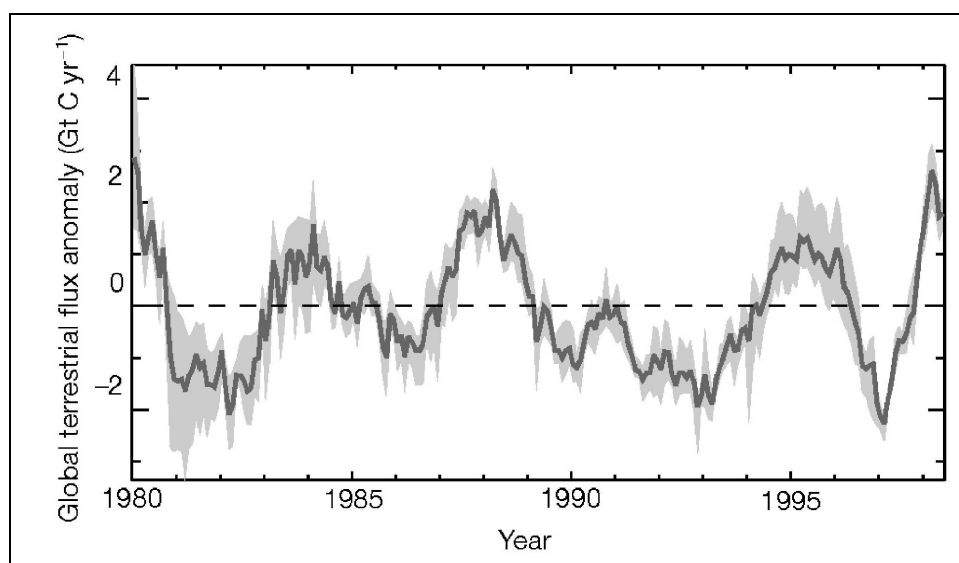


Figure 1.3 : Ecart à la moyenne (pointillés) des flux de carbone entre l'atmosphère et la biosphère entre 1980 et 1999. Les valeurs positives correspondent à des flux vers l'atmosphère, les valeurs négatives correspondent aux flux de carbone vers la biosphère (Schimel *et al.*, 2001).

3.2.2. Impact de la déforestation sur le cycle du carbone

Ces résultats établis pour le cas d'une forêt intacte sont aujourd'hui remis en cause par les actions anthropiques. Depuis le début de la révolution industrielle au milieu du 19^{ème} siècle, l'homme a perturbé le cycle naturel du carbone en libérant une part importante de carbone stocké dans la lithosphère (exploitation du charbon et du pétrole) et la biosphère (déforestation). Les quantités de carbone (sous forme de dioxyde de carbone CO₂) dans l'atmosphère ont augmenté, passant de 280 ppm (ppm = particules par million) à 366 ppm en 1998 (Malhi et Grace, 2000). Les prévisions pour 2100 varient entre 700 et 980 ppm (Cox *et al.*, 2003). Au Brésil, la déforestation est la première source d'émissions de carbone (entre 150 et 250 millions de tonnes de carbone par an contre 75 millions de tonnes pour la combustion d'hydrocarbures) : Fearnside, 1997b ; Nobre, 2002. Or le CO₂ est reconnu pour être un gaz à effet de serre participant activement au réchauffement climatique.

Si les émissions de carbone liées à l'exploitation des hydrocarbures sont relativement bien connues (entre $6,3 \pm 0,4$ Pg C an⁻¹ ; Ometto *et al.*, 2005), celles dues à la déforestation sont plus compliquées à estimer. Pour Malhi et Grace (2000), la déforestation des forêts tropicales dégage 2,4 Pg C an⁻¹ à l'échelle planétaire, i.e. plus que la capacité de séquestration de carbone par les forêts. Toutefois, DeFries *et al.* (2002) ont obtenu des résultats bien inférieurs (entre 0,5 et 1,36 Pg C an⁻¹ dans les années 1990) à partir de données satellitaires NOAA et l'application d'un modèle d'estimation de flux de carbone. Les modèles basés sur les données de terrain présentent également les régions tropicales comme étant des puits absorbant plus de carbone que la déforestation n'en émet (Richey *et al.*, 2002). Il existe donc de fortes incertitudes illustrées par la variabilité des résultats obtenus en Amazonie : la déforestation y serait responsable des émissions de 0,10 à 0,90 Pg C an⁻¹ (Nobre, 2002 ; Fearnside, 1997b ; Ometto *et al.*, 2005 ; Cramer *et al.*, 2004).

De nombreuses recherches doivent donc encore être accomplies dans ce domaine. Il est nécessaire que celles-ci prennent en compte certains paramètres trop largement sous-estimés ou mal connus jusqu'à présent. Par exemple, les calculs à l'échelle du bassin amazonien dépendent de la superficie qui est attribuée au couvert forestier et donc de ce qui est considéré comme étant « forêt » ou « non-forêt » (Cramer *et al.*, 2004). En outre, la déforestation sélective est souvent omise alors que Fearnside et Laurance (2003) estiment que les forêts dégradées dans le monde tropical émettent 0,4 Pg C an⁻¹. Les calculs ne prennent également pas en compte les émissions de carbone provenant des rivières et des zones humides qui seraient de l'ordre de 0,5 Pg C an⁻¹ pour l'ensemble du bassin amazonien, soit 1 tonne C ha⁻¹ an⁻¹ (Richey *et al.*, 2002 ; Nobre, 2002 ; Ometto *et al.*, 2005). Fearnside (1997b) dénonce également l'impact des barrages hydroélectriques dont les 5500 km² d'extension auraient dégagé 0,038 Pg C an⁻¹ de carbone (basé sur l'extension des barrages en 1990). Les mesures d'émissions devraient aussi considérer l'utilisation du sol qui est faite après la déforestation. Il faut donc différencier les émissions ponctuelles (« *prompt emissions* » : émissions découlant du déboisement en soi) des émissions retardées (« *delayed emissions* » : émissions vers l'atmosphère réalisées dans les années suivant le déboisement) (Fearnside, 1997b). Deux parcelles défrichées et semées en cultures annuelles ou en pâturage ne présentent pas les mêmes potentiels de séquestration du carbone qu'une forêt secondaire (Fearnside, 1997b; Cramer *et al.*, 2004). Les sols échangent également de grandes quantités de carbone avec l'atmosphère. Une terre semée en pâturage émettrait ainsi 3,92 t/ha (Fearnside, 1997b). Enfin, les forêts dégradées et fragmentées sont également plus

vulnérables aux feux de forêt et donc potentiellement plus émettrices de carbone (Fearnside, 1997b ; Cochrane *et al.*, 1999).

En résumé, le bilan du cycle du carbone dans les forêts tropicales est à peu près neutre (Schimel *et al.*, 2001 ; Houghton, 2003). Deux alternatives sont possibles pour expliquer ce bilan : (i) les fortes émissions de carbone dues à la déforestation sont compensées par un important puits de carbone en forêt tropicale, ou (ii) les émissions de carbone par la déforestation sont modérées et le bilan du carbone des forêts vierges est presque neutre (Houghton, 2003).

Les échanges du cycle du carbone et leurs valeurs associées sont pris en compte dans une équation bilan présentée par Malhi et Grace (2000) et reprise par Ometto *et al.* (2005). Cette équation permet de comprendre comment se répartit l'augmentation de carbone d'origine anthropique et est définie par la formule suivante :

$$E_{ff} + E_{trop} = \Delta_{atm} + \Delta_{ocean} + \Delta_{trop} + \Delta_{autre}$$

où :

E_{trop} représente les émissions de carbone dues à la déforestation (1,4 à 3 Pg C an⁻¹);

E_{ff} représente les émissions de carbone dues à l'exploitation des hydrocarbures (6,3 ± 0,4 Pg C an⁻¹) ;

Δ_{atm} représente l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère (3,2 ± 0,1 Pg C an⁻¹);

Δ_{ocean} représente la part du surplus de carbone de l'atmosphère captée par les océans (2,1 ± 0,7 Pg C an⁻¹) ;

Δ_{trop} représente la part du surplus de carbone de l'atmosphère captée par la biosphère (-1,0 ± 0,8 Pg C an⁻¹) ;

Δ_{autre} représente le puits de carbone terrestre résiduel.

Le puits de carbone résiduel correspond à la partie non expliquée de l'équation bilan. En effet, étant donné les valeurs attribuées aux composantes de l'équation (fig. 1.4), entre -1,6 et -4,8 Pg de carbone disparaîtraient annuellement. Il existe donc aujourd'hui de grandes incertitudes sur les estimations de flux de carbone en Amazonie liées au manque d'informations fiables. Le paradigme affirmant que les forêts tropicales seraient en situation de climax (égalité entre absorption et émission de carbone) est remis en question et il reste compliqué de déterminer si l'Amazonie est un puits ou une source de carbone (Ometto *et al.*, 2005).

Par ailleurs, alors que la problématique environnementale de fond est le réchauffement climatique, il faut garder à l'esprit que le CO₂ n'est qu'un gaz à effet de serre parmi d'autres. Par exemple, le méthane (dont l'impact sur le réchauffement climatique, à quantité égale, est 24,5 fois supérieur à celui du CO₂) est émis en grande quantité dans l'atmosphère lors des brûlis et par les bovins et les termites présents dans les parcelles récemment défrichées et converties en pâturage (Fearnside, 1997b ; Fearnside et Laurance, 2003). Les zones humides et les barrages hydroélectriques sont également de forts émetteurs de méthane CH₄ (émissions de 5,1 millions de tonnes CH₄ par an par les zones humides). D'autres gaz tels que le CO (monoxyde de carbone) ou le N₂O (oxyde nitrique) sont relâchés lors de la combustion ou de la décomposition de biomasse et ont également des effets néfastes sur l'environnement (Fearnside, 1997b).

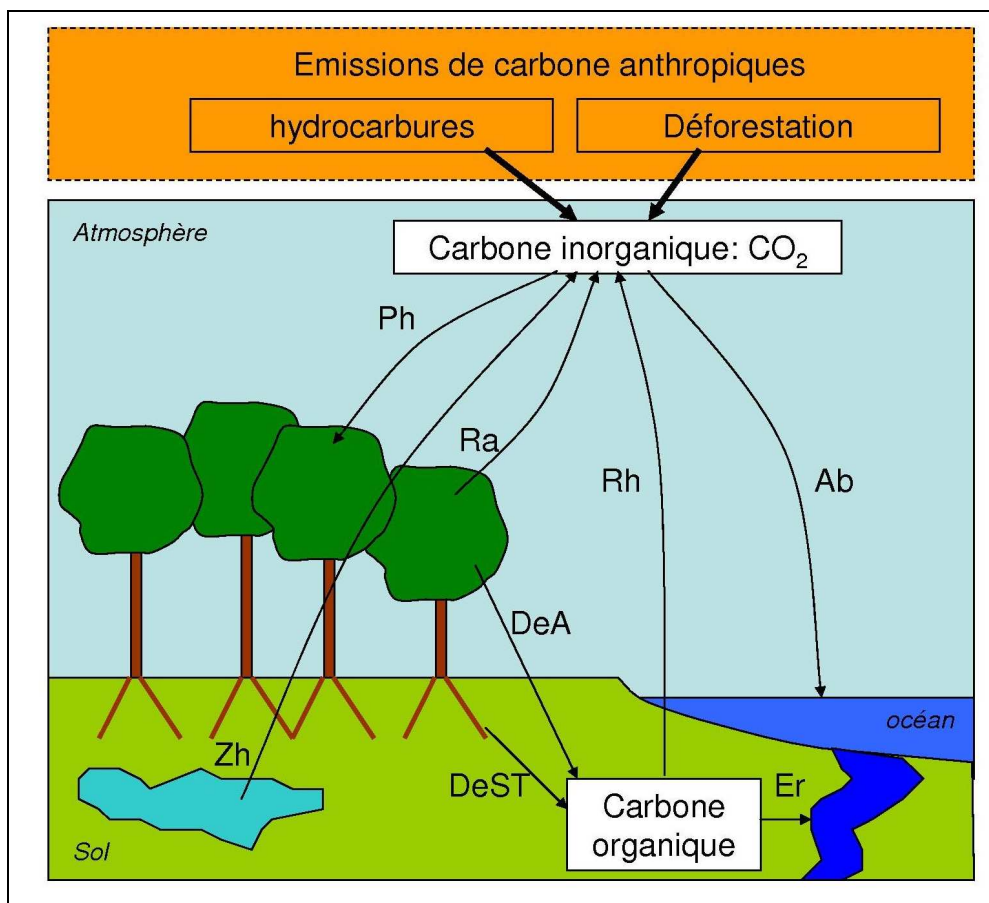


Figure 1.4 : Présentation du cycle du carbone avec **Ph** (Photosynthèse) = 30,4 t C/ha en Amazonie; **Ra** (Respiration autotrophique) = 14,8 tC/ha en Amazonie; **Rh** (Respiration hétérotrophique) = 9,7 tC/ha en Amazonie; **DeA** (Décomposition de la biomasse en surface) = 7 tC/ha en Amazonie; **DeST** (Décomposition de la biomasse sous-terrainne) = 6,3 tC/ha en Amazonie; **Er** (Erosion du carbone vers les océans) = 0,4 à 0,7 Pg C/an pour le monde ; **Zh** (Emissions de carbone par les zones humides) = 0,5 Pg C/an pour l'Amazonie; **Ab** (Absorption de carbone atmosphérique par les océans) = 2,1 ± 0,7 Pg C/an pour l'ensemble des océans du monde; **hydrocarbures** (émissions de carbone par exploitation des énergies fossiles) = 6,3 ± 0,4 Pg C/an ; **Déforestation** (émissions de carbone par la déforestation) = entre 0,1 et 0,9 Pg C/an en Amazonie (plus déforestation sélective = 0,4 Pg C/an pour les forêts tropicales du monde).

Ainsi, si il est acquis que la déforestation est une source d'émission de gaz à effet de serre, le doute persiste sur le potentiel de la forêt amazonienne à supporter le changement climatique. Des modèles ont évalué l'impact du changement climatique global sur l'Amazonie et le cycle du carbone. Cette méthode appliquée par Cox *et al.* (2003) et Cramer *et al.* (2004) présente des résultats alarmants à l'horizon 2100. Le climat amazonien serait affecté par des changements globaux et régionaux. Les modèles prévoient une hausse moyenne des températures de 4 à 5,5°C à l'échelle de la planète et une baisse des précipitations en Amazonie (Cox *et al.*, 2003). A échelle régionale, la hausse des températures et du CO₂ s'accompagnerait d'une augmentation de biomasse due à une augmentation de la photosynthèse. Le problème est que, au dessus d'un certain seuil de température et de sécheresse, le stress hydrique inhiberait la photosynthèse et entraînerait une perte de biomasse mesurée à 8 kg C m⁻² (Cox *et al.*, 2003). Par ailleurs, une simple vision de l'impact du changement climatique est en fait incomplète. Il faut en effet considérer le rôle que joue la végétation elle-même sur le changement climatique. Un nouveau modèle proposé par Cox *et*

al. (2003) a la particularité de prendre en considération les rétroactions (« *feedback* ») en jeu dans ce système (on parle de modèle *online*, à l'inverse des modèles *offline* qui n'analysent que l'impact du changement climatique sur la végétation). Ce modèle prévoit une hausse de la température de 10°C en Amazonie et une très forte baisse des précipitations (64%). Le recul de la végétation résultant de tels changements aurait pour conséquence d'augmenter les émissions de CO₂ par hausse de la respiration (des plantes et du sol) et baisse de la photosynthèse (par recul de la forêt aux dépens du *cerrado*). Les estimations de concentration en CO₂ en sortie de ce modèle sont alors de 980 ppmv en 2100 (contre 700 ppmv dans un modèle sans boucle de retour). Les auteurs concluent donc: « *forest dieback is therefore acting to amplify the Amazon drying which causes it* » (Cox et al., 2003).

3.3. Le cycle de l'eau

3.3.1. Un cycle de l'eau soumis à de fortes variabilités spatio-temporelles

L'eau douce représente environ 2,5% de l'eau présente sur Terre. Etant donné qu'une majorité de cette eau est stockée sous terre ou dans les glaciers, il reste en fait une faible quantité d'eau directement utilisable par l'homme et, qui plus est, cette eau est inégalement répartie dans le monde (Oki et Kanae, 2006). La gestion de l'eau à échelle globale est donc un des défis que l'humanité aura à résoudre à l'avenir. Or, l'eau potentiellement utilisable est incluse dans un cycle fermé qui est fortement perturbé par le changement climatique et les changements d'occupation du sol. Ce constat est notamment valable pour le bassin amazonien.

Le cycle de l'eau est basé sur les échanges en eau aux interfaces atmosphère – biosphère – hydrosphère. L'analyse de ces échanges diffère selon l'échelle considérée (fig. 1.5). A l'échelle globale, l'eau contenue dans l'atmosphère est précipitée au sol ou dans les océans. Elle revient alors dans l'atmosphère par évaporation. A l'échelle locale, l'eau de l'atmosphère est transportée par advection avant d'être précipitée en un endroit donné où elle s'infiltré et/ou ruisselle. Le cœur du problème se situe à l'échelle régionale où l'analyse est plus complexe (Eltahir et Bras, 1996).

A cette échelle, le cycle de l'eau se sépare en deux branches : la branche atmosphérique et la branche terrestre. Dans la branche atmosphérique, les molécules d'eau proviennent, d'une part, de l'évaporation des végétaux et du sol de la même région et, d'autre part, de l'évaporation issue d'autres régions et apportées par advection. La question de fond est de déterminer quelle part des précipitations est issue de chaque type de molécules d'eau. Dans la branche terrestre, l'eau précipitée au sol s'évapore ou rejoint l'hydrosphère après ruissellement (ou infiltration) dans le sol avant d'être évaporée. Il s'agit donc d'estimer et de comparer les parts de molécules d'eau évaporées ou ruisselées à échelle régionale (Eltahir et Bras, 1996).

Les principales composantes du cycle de l'eau sont les précipitations P , l'évaporation E et l'écoulement (« *runoff* ») R . Le cycle de l'eau peut être défini par la formule (Costa et Foley, 1999 ; Marengo, 2005) :

$$P = E + R \pm dR$$

avec dR correspondant à une réserve d'eau créée par l'eau s'infiltrant dans le sol. Dans le cas d'un système équilibré sur le long terme, $dR = 0$ (Costa et Foley, 1999).

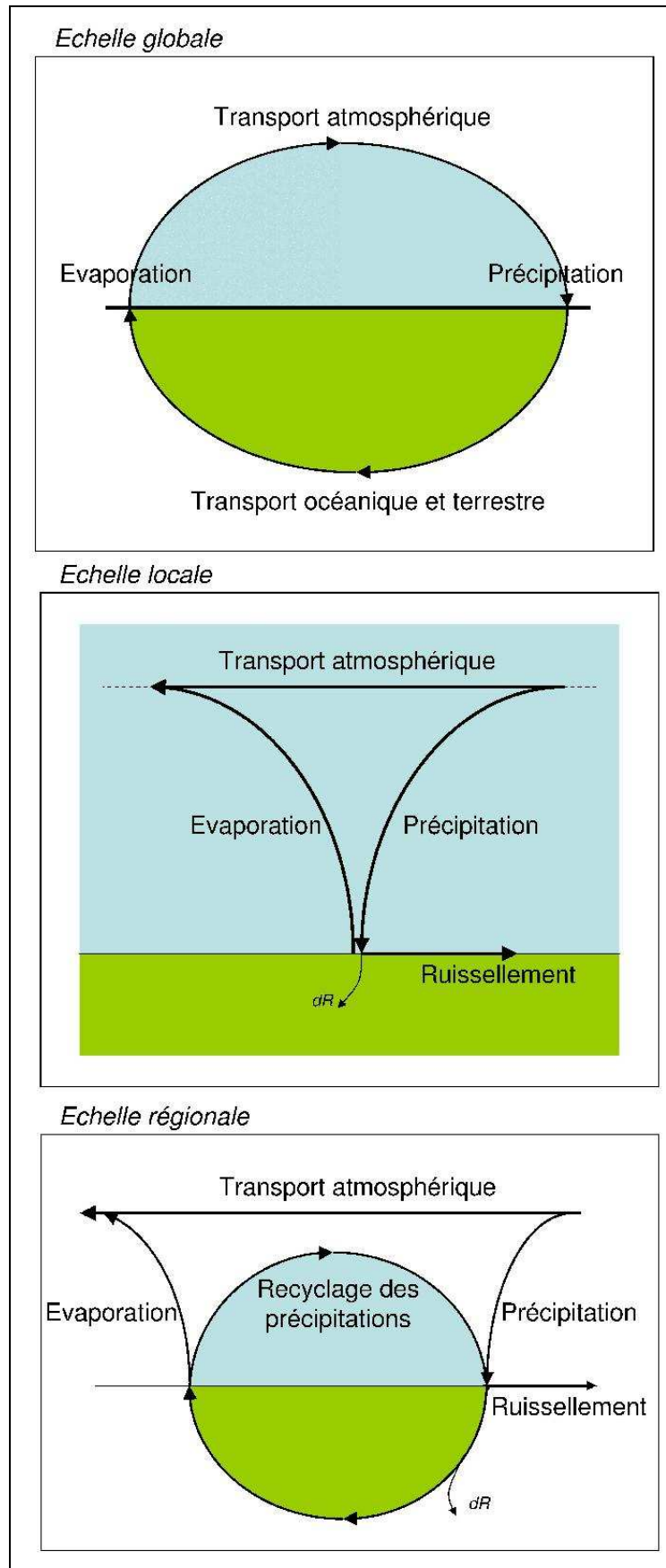


Figure 1.5 : Présentation du cycle de l'eau selon l'échelle d'étude (d'après Eltahir et Bras, 1996).

En Amazonie, les précipitations P sont estimées à 5,8 mm par jour, soit 2117 mm par an en moyenne. Le débit de l'Amazone à l'embouchure est estimé à 210000 m³/s, ce qui équivaut à un écoulement R de 2,9 mm par jour (Marengo, 2006). En fait, l'eau précipitée au sol peut être évacuée par écoulement de superficie ou souterrain après infiltration. La quantité d'eau s'infiltrant dans le sol est estimée à 200 mm par mois en moyenne (Zeng, 1999). Mais sur le long terme, l'eau souterraine regagne le cycle de l'eau par évapotranspiration (E) des plantes ou en rejoignant l'océan. Sa présence est généralement incluse dans la composante R . Enfin, l'évaporation E est estimée à 4,3 mm par jour (Marengo, 2006).

Trois informations ressortent de ces valeurs :

- $P > E$ indique que le bassin amazonien joue un rôle de puits d'humidité (Marengo, 2005) ;
- Molion (1975) a défini le taux de recyclage des précipitations (ρ) comme étant la contribution de la part d'évaporation dans le bassin dans le total des précipitations.

Ainsi :

$$\rho = \frac{E}{P}$$

Les premières estimations de Molion (1975) ont déterminé un taux de recyclage de 56% pour l'ensemble du bassin amazonien.

- l'équation n'est pas vérifiée car elle est incomplète.

L'équation de Molion (1975) a été critiquée par Eltahir et Bras (1996) car elle ne prend pas en compte les échanges d'humidité entre bassins. Costa et Foley (1999) indiquent en effet qu'il existe des apports importants de vapeur d'eau en provenance de l'Atlantique Sud par des vents d'est et de l'Atlantique tropical par des vents de nord. Marengo (2006) met quant à lui l'accent sur le fait qu'une partie de l'évaporation en Amazonie est transportée vers le bassin de la Plata¹ (au sud du Brésil) par le Jet sud-américain qui longe l'est des Andes. Ainsi, il manque un élément dans l'équation du cycle de l'eau qui correspond aux échanges de vapeur d'eau par advection entre bassins hydrologiques. Cet élément est défini comme étant la convergence d'humidité (« *moisture convergence* ») C qui équivaut à la différence entre la quantité de vapeur d'eau apportée dans le bassin (I) et la quantité de vapeur d'eau exportée du bassin (O) (Costa et Foley, 1999). Selon Marengo (2005), C équivaut en moyenne à 1,4 mm par jour en Amazonie.

A partir de ces nouveaux éléments, une nouvelle formule du recyclage des précipitations est proposée (Eltahir et Bras, 1996 ; Costa et Foley, 1999) :

$$\rho = \frac{E}{E + I}$$

En incluant ces paramètres, le taux de recyclage chute largement, se situant entre 20% et 35% (Eltahir et Bras, 1996), démontrant à la fois (i) l'importance des transports de vapeur d'eau d'échelle globale dans le cycle de l'eau en Amazonie et (ii) l'importance de l'Amazonie dans les cycles de l'eau à l'échelle continentale. Ce cycle est résumé par la figure 1.6 réalisée par Eltahir et Bras (1996) présentant le bilan du cycle de l'eau en Amazonie.

¹ Voir aussi Vulquin (1979) et Vulquin (1988) à propos sur la circulation atmosphérique en zone intertropicale et le climat dans le bassin de la Plata, à Buenos Aires.

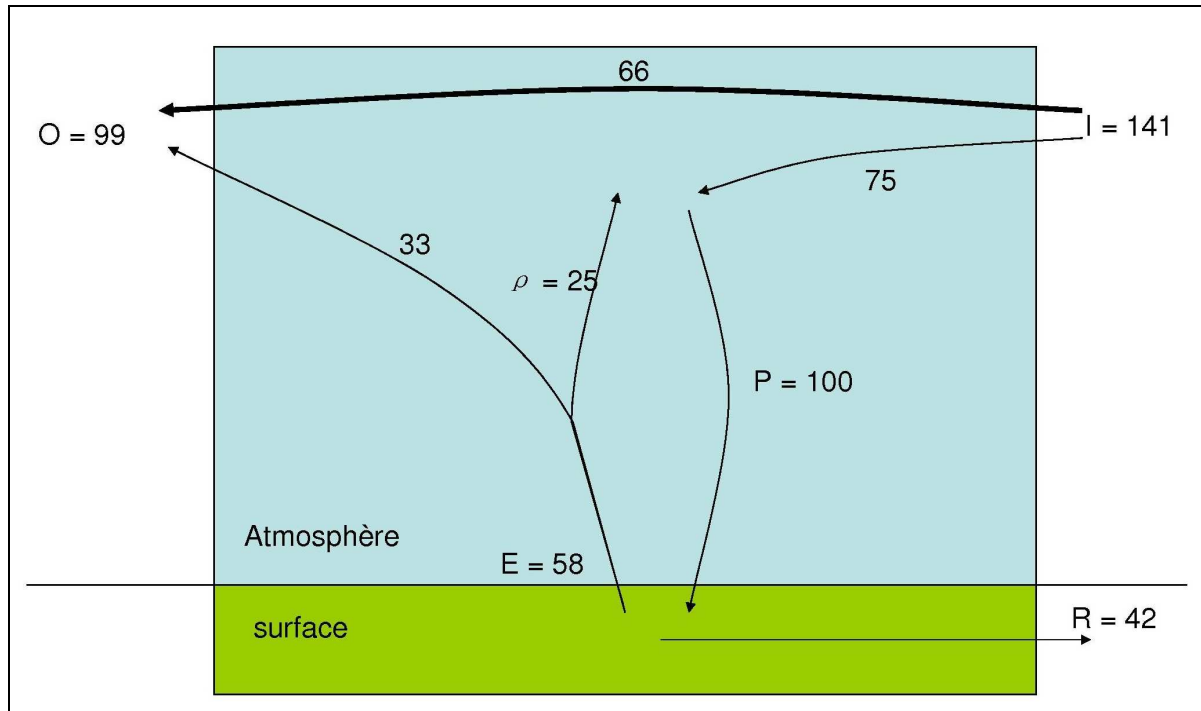


Figure 1.6 : Bilan du cycle de l'eau en Amazonie avec $P = 100\% = 1950$ mm/an (Eltahir et Bras, 1996) avec $P =$ Précipitations ; $R =$ Ecoulement (*runoff*) ; $I =$ vapeur d'eau importée ; $O =$ vapeur d'eau exportée ; $E =$ Evaporation ; $\rho =$ Recyclage des précipitations.

Sur le long terme, à l'échelle du bassin, on estime que les apports d'humidité par advection (C) s'équilibrent avec les écoulements d'eau (R). On émet aussi l'hypothèse que toute l'humidité présente dans l'atmosphère (apportée par C et E) est précipitée. Ainsi, deux équations permettent de vérifier si le cycle de l'eau est en équilibre (Marengo, 2005):

$$\text{Imbalance} = \frac{C}{R} - 1 \text{ que l'on suppose égale à } 0 \text{ dans un système fermé.}$$

et

$$\text{Imbalance} = P - E - C \text{ que l'on suppose égale à } 0 \text{ dans un système fermé.}$$

Le système théorique de la figure 1.6 est donc en équilibre puisque $R = C = I - O = 42$ et $P = E + C$. Cependant, les valeurs mesurées par Zeng (1999) et Marengo (2005) ne permettent pas de fermer le cycle de l'eau (tableau 1.2).

	P (mm/jour)	E (mm/jour)	R (mm/jour)	C (mm/jour)	$(C/R)-1$ (%)	$P-E-C$ (mm/jour)
Marengo (2005)	5.8	4.3	2.9	1.4	51	0.1
Zeng (1999)	5.6	4.6	3	0.8	73	0.2

Tableau 1.2 : Comparaison des estimations des paramètres P , E , R , C et Imbalance par Marengo (2005) et Zeng (1999).

Marengo (2005) explique ces différences par les incertitudes liées aux données employées (issues de stations sur le terrain ou de réanalyses climatologiques) et à la variabilité interannuelle des composantes du cycle de l'eau.

En effet, le cycle de l'eau est soumis à de fortes variabilités spatio-temporelles. Tout d'abord, les termes du cycle de l'eau sont soumis à une variation saisonnière forte (Marengo, 2005 ; Marengo, 2006 ; Zeng, 1999). Les précipitations (P) sont plus élevées entre janvier et mars au Sud du bassin et entre avril et mai au Nord, ce qui se traduit par un pic de l'écoulement (R) dans l'Amazonie 3 à 4 mois plus tard (Zeng, 1999). Ce délai correspond au temps nécessaire à l'eau pour traverser le bassin et rejoindre l'embouchure (Marengo, 2006). La quantité d'eau retenue dans le sol varie également au cours de l'année, suivant le même rythme que les précipitations. Par contre, l'évaporation reste quasiment constante tout au long de l'année (Zeng, 1999). En conséquence, le taux de recyclage des précipitations (ρ) varie également, étant plus élevé en saison sèche qu'en saison humide (Marengo, 2005). Par ailleurs, ces variations saisonnières sont plus marquées au sud du bassin qu'au nord.

A l'échelle pluriannuelle, la régulation du cycle de l'eau est notamment liée à des événements d'échelle globale comme les épisodes ENSO/LNSO (Roucou, 1997 ; Marengo, 2006)¹. En Amazonie, les épisodes El Niño (La Niña) entraînent des baisses (hausses) de précipitations accompagnées d'une hausse (baisse) du taux de recyclage des précipitations (cf. Partie 4 - Chapitre 1). Enfin, Costa et Foley (1999) ont détecté une tendance à la baisse des transports d'humidité vers et en dehors du bassin (I et O) entre 1976 et 1996. Cette baisse se fait notamment ressentir au sud-est du bassin par une diminution des apports d'humidité en provenance de l'Atlantique sud. Cependant, la convergence d'humidité (C) ne baisse pas significativement tandis que le taux de recyclage (ρ) des précipitations augmente.

3.3.2. Impact de la déforestation sur le cycle de l'eau

L'enjeu sous-jacent à ces thématiques consiste à évaluer l'impact des changements d'occupation du sol, et notamment de la déforestation, sur les cycles de l'eau atmosphérique et terrestre. Selon D'Almeida *et al.* (2007), les conséquences de la déforestation sont évaluées différemment selon les échelles d'étude. A l'échelle du bassin, les modèles prédictifs prévoient une baisse des précipitations (baisse de 64% des précipitations en 2100 selon Cox *et al.*, 2003). Cette forte baisse est due au fait que la déforestation influe sur les précipitations de deux manières : (i) en limitant les advections vers l'intérieur du bassin et (ii) en faisant chuter l'évaporation.

Selon Makarieva *et al.* (2009), la forêt agit comme une pompe rechargeant en humidité les masses d'air advectives venues de l'océan après que celles-ci se déchargent. De la sorte, les auteurs montrent que, lorsque la forêt est maintenue sur pied de manière continue entre l'océan et l'intérieur des continents, les précipitations restent élevées même loin du littoral. A l'inverse, dès que la forêt est déboisée, l'effet de pompe s'estompe et les courants advectifs s'assèchent. Les précipitations chutent alors nettement. Dès lors, Sheil et Murdiyarso (2009) estiment que, plus que les taux de déforestation, c'est la localisation de la déforestation qui affecte les précipitations. Par exemple, défricher une large bande littorale de forêt provoquerait un arrêt de l'effet de pompe qui pourrait entraîner un fort assèchement à l'échelle du bassin.

Par ailleurs, la déforestation fait baisser l'évaporation. Cette baisse de l'évaporation est confirmée par Durieux (2002) qui analyse la couverture nuageuse en Amazonie. Celui-ci

¹ L'influence des épisodes ENSO/LNSO sur le cycle de l'eau se fait d'ailleurs ressentir dans d'autres régions que l'Amérique du sud (Roucou, 1997) et notamment en Afrique (Bigot, 2004 ; Brou, 2005 ; voir aussi les résultats du projet AMMA – Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine : <http://www.amma-international.org>).

observe « une tendance climatique d'échelle plus large qui affecte l'ensemble de l'arc de déforestation. Cette tendance est marquée par une décroissance de la couverture nuageuse totale et de la couverture de nuages hauts pour toutes les cellules de la grille. A cette tendance, s'ajoute une croissance de la pression au sommet des nuages qui signifie que les nuages ont tendance à être plus bas et que la convection est peut-être moins profonde ». La baisse d'évaporation est aggravée par le fait que l'eau stockée en profondeur dans le sol n'est plus captée par la végétation suivant le défrichement (pâturage ou cultures) dont les racines sont moins profondes que la forêt (Zeng, 1999 ; Sampaio *et al.*, 2007). L'écoulement de surface et donc les débits des rivières amazoniennes devraient également baisser en conséquence de la chute des précipitations.

La baisse de précipitations (combinée à la hausse des températures résultant des fortes émissions de gaz à effet de serre) entraînerait alors une savanisation de l'Amazonie (Durieux, 2002). Ce phénomène de progression de la savane aux dépens de la forêt est également évoqué en Afrique par Bigot *et al.* (2005) qui mettent aussi en avant le rôle des activités anthropiques pour expliquer ces changements : « Face au poids des variations climatiques en zone tropicale humide, le rôle des sociétés reste souvent prépondérant et explique une large part des différenciations phyogéographiques régionales ».

A l'échelle locale, les conclusions issues d'observations au sol confirment surtout le fait que la déforestation entraîne une baisse d'évaporation et une augmentation du ruissellement. En effet, entre 10 et 22% de l'eau précipitée est interceptée par la canopée (Marengo, 2006). Si celle-ci est supprimée, la quantité d'eau atteignant le sol est donc supérieure. Cette augmentation, couplée à une plus grande compaction des sols et à des racines moins profondes (D'Almeida *et al.*, 2007), s'accompagne d'une hausse du ruissellement et de l'érosion (Marengo, 2006).

Par contre, à méso-échelle, aucune tendance significative n'apparaît. Ceci s'explique par le fait que, pour le moment, la dynamique atmosphérique d'échelle globale influence plus largement le climat amazonien que la déforestation. Surtout, le réseau de stations d'observations actuel n'est pas assez complet pour permettre de faire des analyses de qualité à cette échelle (D'Almeida *et al.*, 2007). Toutefois, à partir de modèles appliqués dans l'est amazonien, Sampaio *et al.* (2007) ont démontré que les précipitations baissaient lorsque plus de 40% de la forêt était converti en pâturage ou en soja. Le maintien des précipitations passe donc par une préservation efficace de l'Amazonie.

4. La préservation de l'Amazonie au 21^{ème} siècle

Aujourd'hui, l'Etat doit trouver un compromis entre la nécessité de préserver la forêt amazonienne et le souhait de poursuivre l'intégration de la région nord à l'économie nationale (De Mello et Théry, 2003). En conséquence, il impose sa gouvernance de manière parfois contradictoire et conflictuelle qui se répercute à toutes les échelles d'étude (internationale, nationale, locale) (Becker, 2001). Il s'agit de mettre en place des règles viables pour le développement de l'économie nationale et acceptables par les partenaires internationaux d'un point de vue environnemental.

4.1. Une pression internationale pour la préservation de l'Amazonie

A l'échelle internationale, les règles de préservation sont le fruit de concertations et de négociations qui se heurtent à deux obstacles principaux présentés par Fearnside (1997c).

Premièrement, la conservation des services écosystémiques a un coût et le problème à résoudre consiste à savoir quelle valeur lui attribuer. Alors que tout le monde s'accorde à dire que ces services apportent des bénéfices environnementaux, il est extrêmement compliqué de leur attribuer une valeur objective. Par exemple, à propos de la biodiversité, Béné et Doyen (2008) affirment : « *the ecological difficulty to evaluate biodiversity is further complicated by our present economic inability to list the detailed roles and economic contributions of living organisms and in particular to predict their potentialities to produce specific goods and services of interest for the future* ». Le problème de l'évaluation de la valeur de la biodiversité repose donc sur la compréhension des différents services qu'elle peut rendre à travers son utilisation directe ou indirecte (exploitation de la biodiversité à travers l'extractivisme par exemple), sa non-utilisation (capture de carbone, limitation des maladies pour les cultures...) et sa valeur optionnelle (la probabilité d'en tirer un profit commercial à l'avenir) (Béné et Doyen, 2008). Ces réflexions sont également valables pour les cycles du carbone et de l'eau. Toutefois, alors que ces derniers sont théoriquement réversibles, la perte de biodiversité est quant à elle définitive (Fearnside, 1997c).

L'estimation d'une valeur à attribuer aux services environnementaux est donc complexe. Elle peut se calculer à partir de deux points de vue opposés présentés par Alexander *et al.* (1998). D'un côté, on peut considérer un « PIB vert » qui correspondrait à la valeur d'un stock de ressources naturelles disponibles sur un territoire. Ce stock est recalculé tous les ans afin de suivre son évolution, en mesurant donc les pertes (baisse de la biodiversité, réduction des forêts) et les gains (reforestation). De l'autre côté, il est possible de considérer l'écosystème et ses services comme une donnée d'entrée d'un modèle économique productiviste. Par exemple, dans le cas de l'agriculture, les rendements sont dépendants des intrants « industriels » (fertilisants, travail agricole...) et des services environnementaux (qualité des sols, précipitations, température...). De la même manière que les coûts de production liés aux intrants « industriels » peuvent être calculés, la valeur des services environnementaux fournis doit être mesurable.

Deuxièmement, quand bien même un accord sur une valeur à attribuer aux services environnementaux serait trouvé, la désignation du payeur se pose. Deux points de vue extrêmes et non acceptables s'opposent entre les acteurs concernés (Fearnside, 1997c). D'une part, le pays disposant d'une grande biodiversité peut négocier sous forme de « chantage » pour défendre ses intérêts nationaux : si les pays « développés » refusent de payer pour la protection environnementale, alors le déboisement continuera. D'autre part, les pays « développés » peuvent estimer que les pays à grande biodiversité ont l'obligation de s'occuper de la protection environnementale sur leurs territoires, donc toute aide financière à leur accorder ne peut être que facultative. La solution au problème se trouve certainement entre ces deux positions extrêmes et il convient donc d'analyser les efforts produits par chacun des acteurs pour participer à la préservation de la forêt amazonienne.

Aujourd'hui, le principal effort réalisé à l'échelle internationale pour la protection de l'Amazonie est réalisé dans le cadre du PP-G7 (*Programme pilote pour la conservation des forêts de l'Amazonie brésilienne*) lancé en 1994 (Becker, 2001). Ce programme est administré par la Banque Mondiale, financé par l'Union Européenne, le Canada, la France, l'Allemagne, l'Italie, les Pays-bas, les Etats-Unis, le Royaume-Uni et exécuté par le Brésil (De Mello et Théry, 2003). Ces partenaires ont investi 428 millions de dollars jusqu'en 2005 qui ont servi à la démarcation de 45 millions d'hectares de terres indigènes et 2,1 millions d'hectares de

réserves extractivistes et ont permis la mise en place de nombreux projets communautaires¹. En fait, De Mello et Théry (2003) notent que ce projet « a évolué jusqu'à mettre au premier plan le développement durable, partant du principe qu'assurer aux populations locales les moyens de vivre décemment était le meilleur moyen de réduire les déboisements ». Les programmes de recherches précédemment mentionnées (LBA, PROBEM, SIVAM/SIPAM) sont également un exemple de coopération internationale pour améliorer la conservation de l'Amazonie. Enfin, le dernier effort en date est la création du *Fundo Amazônia*² (2008) administré par le BNDES³ qui a pour but de récolter des fonds internationaux non remboursables (dont le potentiel est estimé à 21 milliards de dollars d'ici à 2011)⁴ afin de financer des programmes de développement durable en Amazonie et d'améliorer le contrôle de la déforestation.

4.2. Des actions efficaces à échelle nationale et locale

Les programmes internationaux de préservation de la forêt amazonienne sont donc surtout des programmes de soutien financier aux actions publiques nationales. Ces dernières se traduisent notamment par une législation plus contraignante pour les migrants et la création d'espaces protégés.

4.2.1. La législation environnementale en Amazonie

Le gouvernement a inscrit son devoir de protection de l'environnement et des communautés indigènes dans sa constitution de 1988 (De Mello et Théry, 2003). Cela s'est notamment traduit par l'actualisation du Code Forestier⁵ en 1989. Celui-ci prévoit des règles draconiennes pour réguler la déforestation. Chaque propriétaire foncier est tenu de conserver une partie de la végétation naturelle sur son terrain : la « réserve légale ». Le pourcentage de la superficie de la propriété à conserver dans cette « réserve légale » varie selon le biome concerné :

- en Amazonie, 80% de la propriété doit être préservée ;
- dans le *cerrado* de l'Amazonie Légale, 35% de la propriété doit être préservée ;
- dans les autres régions, 20% de la propriété doit être préservée.

Cette loi (art.16), actualisée en 2001, n'est pas souvent appliquée par les producteurs. Ceux-ci ont généralement défriché avant la date de parution de la loi et n'ont plus la possibilité aujourd'hui de reboiser des superficies aussi grandes. Ils peuvent alors compenser cette infraction en achetant un lot de forêt, dans le même micro-bassin hydrographique, que l'Etat se chargera de préserver.

Par ailleurs, l'article 2 du même code forestier instaure depuis 1989 l'obligation de préserver les fortes pentes et les berges des cours d'eau : les « Aires de Protection Permanentes » (APP). La largeur de la berge à préserver varie selon la largeur du cours d'eau (de 30 m de forêt de part et d'autre d'un cours d'eau inférieur à 10 m de large jusque 500 m de part et d'autre d'un cours d'eau supérieur à 600 m de large). Contrairement aux réserves

¹ <http://web.worldbank.org/>

² http://www.bndes.gov.br/noticias/2008/not119_08.asp

³ Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social est un organe relié au Ministère du Développement, Industrie et Commerce Extérieur.

⁴ Il est fort possible que ces chiffres soient revus à la baisse suite à la crise économique mondiale.

⁵ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L4771.htm

légales, les APP ne peuvent être ni compensées, ni exploitées. Elles doivent donc être reboisées si une partie a été défrichée.

Ce code forestier est aujourd'hui critiqué et il existe un débat entre le Ministère de l'Environnement et le Ministère de l'Agriculture pour déterminer les changements à y apporter¹. Ce débat traduit bien les difficultés du gouvernement pour assurer à la fois la protection de l'environnement tout en maintenant le développement économique.

4.2.2. Les espaces protégés : un frein à la déforestation

Dans son rôle d'aménageur de l'espace amazonien, l'Etat a prévu de réaliser des zonages socio-économiques et de créer des espaces protégés pour leur intérêt environnemental (Unités de Conservation) et social (terres indigènes et réserves extractivistes). La création de ces espaces fait débat à deux niveaux : (i) la localisation et (ii) le mode de protection.

Les différents espaces protégés ont permis aujourd'hui de protéger 31,1% du biome amazonien, i. e. 1 318 329 km² (fig. 1.7). Les terres indigènes représentent le mode de protection privilégié (17,7% de l'Amazonie est classé en terre indigène). Par contre, le *cerrado* est beaucoup moins protégé, avec seulement 2,2% de sa superficie située dans des réserves en 2004 (Klink et Machado, 2004). Pourtant, ce biome est considéré comme un « *hotspot* » mondial pour son importante biodiversité (Myers *et al.*, 2000). Par ailleurs, même si les espaces protégés en Amazonie sont importants (31,1%), on peut regretter que la plupart des réserves se situent dans des zones en dehors de l'arc de déforestation. Ces réserves ont donc un intérêt limité pour lutter contre la déforestation à l'échelle nationale. Cependant, Soares-Filho *et al.* (2006) notent que des efforts sont réalisés pour résoudre ce problème puisque 7 millions d'hectares de nouvelles réserves ont été créées dans les régions de front pionnier en 2004 et 2005).

Le choix du mode de protection de la forêt est primordial. Il s'agit de déterminer si il est plus efficace de protéger la forêt par des parcs inhabités ou des parcs habités par des populations « traditionnelles » (amérindiens et extractivistes) (Schwartzmann *et al.*, 2000 ; Soares-Filho *et al.*, 2006). En effet, la croissance démographique et l'adoption du mode de vie « occidental » à moyen terme sont deux facteurs qui font douter de la capacité de ces populations traditionnelles à protéger leur territoire² (Nepstad *et al.*, 2006b ; Le Tourneau, 2006). Toutefois, des études ont prouvé l'efficacité de ces espaces protégés pour lutter contre la déforestation et semblent donc confirmer la viabilité de ce type de démarcation (Schwartzmann *et al.*, 2000 ; Schwartzman et Zimmerman, 2005 ; Nepstad *et al.*, 2006b)³. De plus, ces réserves permettent de réguler les conflits sociaux créés par la progression de « l'Amazonie des routes » aux dépens de « l'Amazonie des fleuves » (Arnauld de Sartre, 2003).

Dans ce cadre, les acteurs redeviennent des éléments centraux de la nouvelle approche du développement en Amazonie et celui-ci n'est plus considéré comme incompatible avec la protection du milieu naturel. On s'oriente alors vers un développement durable qui est

¹ O Estado de São Paulo, 28/01/2009

² Notons ici l'exemple des amérindiens Parecis (Mato Grosso) qui afferment 18000 ha pour la production de soja dans leur terre indigène.

³ En moyenne, la déforestation entre 1992 et 1996 était 2 à 5 fois plus élevées à l'extérieur des réserves qu'à l'intérieur (Nepstad *et al.*, 2006a).

notamment prôné par de nombreuses ONG actives à toutes les échelles dans la région (Arnauld de Sartre, 2003 ; Le Tourneau, 2006).

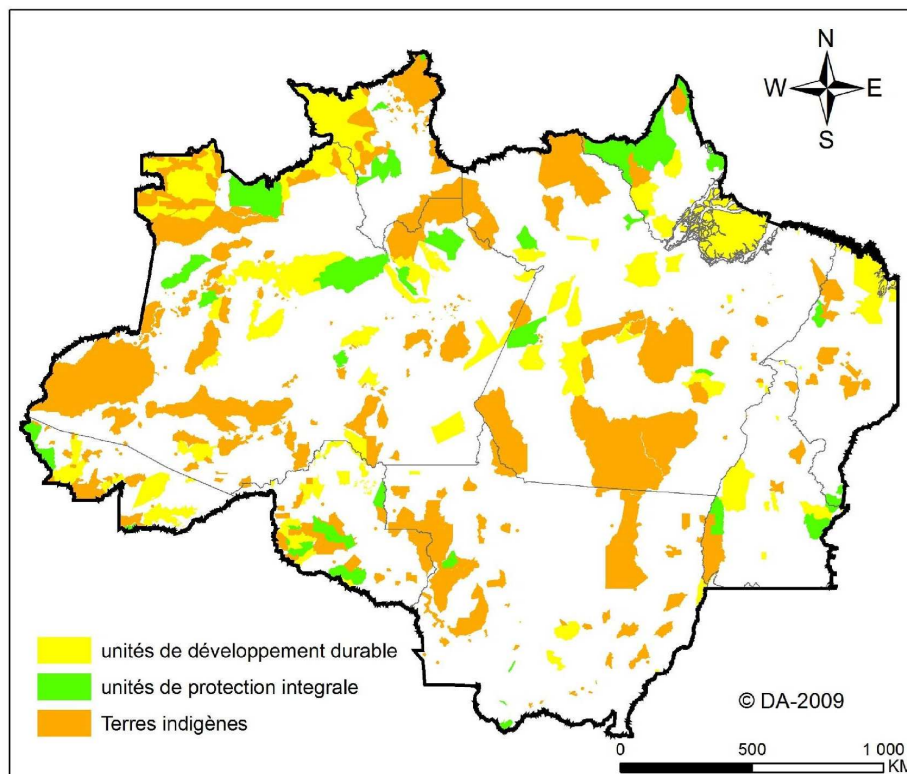


Figure 1.7 : Aires protégées en Amazonie Légale (Source : Ministerio de Transportes)

5. Conclusion

Si l'occupation de l'Amazonie est ancienne, sa véritable conquête par l'Homme ne date que du siècle dernier. A partir des années 1930, les gouvernements brésiliens qui se sont succédés au pouvoir, qu'ils soient démocratiques ou autoritaires, ont souhaité intégrer le territoire amazonien à l'espace national pour résoudre les problèmes socio-économiques nationaux. Aujourd'hui, les derniers projets en cours (PPA 2008-2011, 2007) démontrent la volonté de poursuivre cette intégration nationale, tout en redonnant à l'Amazonie sa place centrale dans le continent sud-américain.

C'est dans ce contexte que s'est organisée la colonisation du Mato Grosso. Celle-ci a été menée par des groupes privés afin de développer l'agriculture mécanisée axée sur la culture du soja. Ce développement a entraîné de nombreux changements d'occupation du sol dans la région et donc des taux de déforestation élevés. Les déboisements causent une perte importante de biodiversité en Amazonie, région considérée comme une *wilderness area* pour son intérêt environnemental. Le *cerrado* est également touché par ce phénomène. De plus, la déforestation perturbe le cycle du carbone à l'échelle globale et sur le long terme. Ces perturbations affectent le climat, et notamment les précipitations qui sont déjà dérégulées par la baisse d'évapotranspiration due à la baisse de la surface forestière. En conséquence, les précipitations pourraient baisser à l'avenir, et la forêt reculer aux dépens du *cerrado*.

Le gouvernement, en tant qu'aménageur du territoire amazonien, doit à présent assurer

le développement régional en intégrant la composante environnementale dans ses décisions. Cela se traduit par l'instauration de lois environnementales et la création d'espaces protégés à titre environnemental ou social. Ces actions, soutenues par la communauté internationale, sont contraignantes pour les propriétaires terriens et notamment pour les producteurs de soja qui doivent intégrer ces nouvelles règles dans leur mode de développement. Cependant, beaucoup de chemin reste à parcourir avant de considérer l'Amazonie comme efficacement protégée.

Chapitre 2. Les fronts pionniers amazoniens : une spécificité matogrossense ?

1. Introduction

Tout au long du 20^{ème} siècle, les dirigeants brésiliens ont mis en place une stratégie d'aménagement du territoire national basée sur l'intégration du Centre-Ouest et de l'Amazonie afin d'assurer à la fois la sécurité et le développement économique du pays, (Foucher, 1991). L'application de cette stratégie s'est traduite par l'apparition d'un front pionnier actif en Amazonie.

Pour Monbeig (1952), un front pionnier est une portion de l'espace en voie d'incorporation à l'oekoumène. Il se présente comme une *zone rurale* assez dense au contact de zones encore vierges (Droulers et Le Tourneau, 2000), ce qui implique une transformation (souvent irréversible) de l'espace naturel (Coy, 1996). L'incorporation de l'espace se fait de manière *dynamique* (Becker, 1986). Le front pionnier se définit donc comme une *limite mouvante* qui sépare les régions peuplées de celles en voie de l'être (Turner, 1963). Il a une *profondeur spatiale* (Dubreuil, 2005) et ne peut pas être représenté par une simple ligne continue (Théry, 2006). Monbeig (1952) préfère d'ailleurs parler de *frange pionnière* (Théry, 2006).

La dynamique du front exprime la progression continue des hommes vers les espaces vierges. Mais, cette progression n'est *pas constante* dans le temps et dans l'espace. Elle est entrecoupée de pauses et de bonds qui expriment la variabilité de la progression de l'occupation *démographique* et *économique* du territoire (Léna, 1986). Ainsi, une bonne compréhension des fronts pionniers nécessite une analyse des sociétés complexes qui les composent (Théry, 2006). Cette analyse passe par l'étude des groupes sociaux présents sur les fronts. Ces groupes ont des modes de conquête de l'espace différenciés, liés à leurs caractéristiques *culturelles, politiques, sociales, économiques, idéologiques et psychologiques* (Léna, 1986).

Comprendre les fronts implique donc de comprendre comment les sociétés s'approprient le milieu pour former de nouveaux territoires. Ceux-ci acquièrent alors des caractéristiques qui sont liées aux classes sociales qui y vivent. Au Mato Grosso, le développement régional a été mené par des propriétaires venus du Sud du pays dans le cadre de projets de colonisation privés orientés vers l'agriculture capitaliste. Les interactions entre cette classe sociale et son milieu naturel définissent en partie la dynamique du front pionnier matogrossense. Ces interactions varient selon les échelles spatiales et temporelles considérées et il est donc essentiel d'approcher la dynamique du front pionnier à partir d'une analyse multiscalair.

2. Les fronts pionniers : des territoires dynamiques

2.1. Une dynamique contrôlée par une logique économique

Les fronts pionniers sont des espaces complexes dont la dynamique spatio-temporelle relève simultanément d'un double processus (Albaladejo *et al.*, 1996) :

- des migrations et installations liées à l'avancée du front ;
- des adaptations et transformations liées aux changements rapides affectant les contextes socio-économiques.

Chacun de ces processus répond à des logiques locales, régionales, nationales et internationales.

A l'échelle globale, les fronts pionniers s'insèrent dans des systèmes mondiaux capitalistes caractérisés par une relation de dépendance entre le centre et la périphérie. D'une part, les frontières situées à la périphérie de l'oekoumène représentent une source de matières premières pour les espaces centraux. Au fur et à mesure que ces matières s'épuisent, la frontière progresse toujours plus en avant. D'autre part, la frontière représente de nouveaux marchés pour les espaces centraux dont les modes de consommation se répandent rapidement aux périphéries. En conséquence, les enjeux socio-économiques liés à la création des fronts pionniers sont forts puisque la dépendance centre/périphérie maintient le sous-développement dans les zones périphériques et assure la concentration du pouvoir dans les centres urbains.

Ce mode de répartition inégale des richesses caractérise l'économie brésilienne qui s'est forgée au cours des différents cycles économiques (canne à sucre, or, caoutchouc, café...). Ces cycles ont permis l'occupation progressive du territoire à travers l'ouverture de fronts pionniers répondant à des logiques économiques. Ainsi, alors que les facteurs géopolitiques et sociaux ont été les premières motivations avancées par les dirigeants politiques pour expliquer l'occupation de l'Amazonie, Sawyer (1984) ou Jepson (2006) préfèrent relativiser le rôle de l'Etat. Pour eux, c'est surtout l'aspect économique qui a poussé la population à migrer. Le front amazonien actuel répond à un processus inévitable qui suit les mêmes mécanismes que les anciens fronts historiques qui ont façonné le territoire brésilien. Pour Sawyer (1984), les fronts avancent et se rétractent de manière complémentaire. La fin d'une frontière se traduit par l'ouverture d'une autre frontière dans un autre endroit. Théry (1996) confirme cette impression : « cette conquête [de l'Amazonie] est bien la suite de celles qui ont poussé les caféiers dans les vallées et sur les plateaux de Rio et de São Paulo, avec la même dominante de prédation et de capitalisme sauvage ».

Les dynamiques de frontière sont en fait guidées par des logiques démographiques et économiques intimement liées. La création de la frontière est d'abord due à un surplus de population dans un endroit d'origine. Au Brésil, ce surplus s'explique par la pénétration du capitalisme dans l'économie nationale qui s'est accompagnée à la fois (i) d'une modernisation de l'agriculture nécessitant moins de main d'œuvre ; (ii) d'une concentration foncière empêchant les classes modestes de s'installer ; et (iii) d'une baisse de la mortalité liée au développement économique. Ainsi, la croissance du capitalisme, en permettant l'augmentation de la production industrielle (voulue par l'Etat pour substituer les importations) combinée à l'expansion des services et de la rapide croissance urbaine, a accru les divisions sociales qui ont poussé les plus pauvres à partir. Mais ces mécanismes ont également multiplié la demande en matériel et en nourriture (Sawyer, 1984), créant de nouveaux marchés à approvisionner. Les migrants ont alors naturellement cherché à s'insérer dans ces nouveaux marchés. Ils se sont donc dirigés vers les régions attractives leur permettant de produire les denrées destinées aux nouveaux marchés de consommation.

En ce sens, la dimension économique est à l'origine de la frontière. Le capitalisme a créé les conditions de la migration vers l'Amazonie à travers les facteurs PUSH (facteurs

poussant les migrants à quitter leur région d'origine) et PULL (facteurs attirant les migrants vers le front) (Mustard *et al.*, 2004). L'Etat n'a fait qu'organiser et accélérer un front qui se serait créé naturellement. C'est d'ailleurs pour cela que la colonisation publique n'a eu qu'un succès limité par rapport à la colonisation spontanée ou privée. Sawyer (1984) conclut même : *“rather than a result of state action, it would be more accurate to consider such occupation as being due to official inaction »*.

Les facteurs économiques agissent sur toutes les classes sociales brésiliennes. Tout comme l'expansion du capitalisme incite les classes les plus modestes à migrer vers les régions attractives, les classes aisées souhaitent également profiter du développement attendu dans ces régions. Certains investissent dans l'achat de nouvelles terres en Amazonie spéculant sur un avenir prometteur pour leur nouvelle propriété. D'autres préfèrent s'installer directement sur le front en rachetant les terres déjà défrichées par les producteurs familiaux, reproduisant ainsi les mêmes structures foncières inégalitaires déjà observées dans les régions d'origine.

2.2. Une organisation spatiale caractéristique

Les migrations des différentes classes de la société forment une mosaïque sociale amazonienne composée notamment : de *garimpeiros* (mineurs), de bûcherons, de cueilleurs, d'amérindiens, de producteurs agricoles, d'agro-industries... L'arrivée simultanée ou décalée de ces classes sociales crée une dynamique du front pionnier. Cette dynamique peut s'analyser selon deux grandes dimensions :

- la dimension spatiale : toutes les classes sociales ne se retrouvent pas sur un même espace et chaque classe détermine son mode d'occupation de l'espace. Il définit un type d'utilisation du sol qui lui est propre.

- la dimension temporelle : une classe sociale prédomine sur un espace à un moment donné. La hiérarchie évolue dans le temps de telle sorte qu'une classe dominante peut être remplacée par une autre (les agriculteurs occupant les parcelles défrichées par les bûcherons par exemple). Un groupe social peut aussi évoluer pour changer de catégorie sociale (les petits agriculteurs devenant des *fazendeiros*).

Les migrations de différentes classes sociales aux dynamiques spatio-temporelles propres, complémentaires (les bûcherons aident les petits producteurs à s'installer) ou opposées (les petits producteurs et les *fazendeiros* peuvent rentrer en conflit pour l'obtention d'une terre), se traduisent par la création de plusieurs fronts qui se superposent à l'échelle régionale (Hennessy in Droulers et Le Tourneau, 2000). La conquête spatiale se caractérise donc par une succession de types d'utilisation du sol qui façonnent des paysages propres à chaque phase de l'évolution de l'espace colonisé. Ces paysages correspondent à différentes phases de développement du front définies par Laques (2003) comme l'avant-front, la frange pionnière et l'arrière-front.

L'avant-front constitue la première étape de l'expansion du front pionnier. Il est lui-même composé de plusieurs fronts :

- un front **extractiviste** (Léna, 1986) qui est surtout le fait des *garimpeiros*, des bûcherons, des *seringueiros* et des cueilleurs (récolte de la noix du Brésil par exemple). Les premiers avancent par bonds au cœur de la forêt à la recherche de gisements à exploiter ou de

cours d'eau pour l'orpaillage. Les seconds pénètrent progressivement dans la forêt pour en extraire les bois précieux. Ces deux classes sociales cohabitent avec les populations des *seringueiros*, des cueilleurs et des amérindiens installés depuis plus longtemps. Celles-ci sont souvent localisées dans des réserves extractivistes ou indigènes.

- un front *potentiel* (Albaladejo *et al.*, 1996) ou *spéculatif* (Summers, 2008) mené surtout dans les années 1970 et 1980 par des entrepreneurs capitalistes cherchant à s'approprier des terres en avant du front pionnier. Ils anticipent en achetant des terres vierges qui se valorisent avec l'arrivée du front.

L'avant-front est donc l'espace de nombreux acteurs aux intérêts divers et souvent conflictuels. Au sein même du front extractiviste, le mode d'expansion des *garimpeiros* et des bûcherons s'oppose à celui des *seringueiros* et des amérindiens. Les nouvelles créations de terres protégées limitent en effet l'installation spontanée des activités minières et sylvicoles¹. L'avancée du front spéculatif s'oppose également à l'avancée du front extractiviste. D'une part, il participe à la fermeture de la frontière en achetant les derniers espaces vierges, limitant ainsi les possibilités d'installation des bûcherons et des mineurs. D'autre part, l'achat de terres par des entrepreneurs complique la démarcation de nouvelles aires protégées².

La frange pionnière est marquée par l'apparition de l'agriculture, qui constitue la principale activité productive sur le front pionnier. Le front agricole est le moteur du front pionnier (Clairay, 2003). Deux modes de production agricole se distinguent: d'une part, l'agriculture traditionnelle familiale et, d'autre part, l'agriculture capitaliste à grande échelle. L'agriculture traditionnelle familiale ou paysanne correspond à un mode de production pré-capitaliste dans lequel « *the family has possession of the means of production directly involved in the appropriation of nature and retains part of the product for its own consumption, while another part is appropriated by third parties as surplus* » (Sawyer, 1984). Elle est l'œuvre des petits colons ayant migré spontanément ou dans le cadre de la colonisation publique encadrée par l'Etat depuis les années 1970. L'agriculture capitaliste est pratiquée par les grands producteurs dont la production est destinée aux marchés nationaux et internationaux. L'arrivée de ces producteurs a notamment été incitée par des incitations fiscales sous le régime militaire. On remarque dans cette catégorie les grands producteurs de soja et les éleveurs.

L'arrière-front représente les dernières phases de l'évolution du front pionnier menant à la consolidation de l'agriculture capitaliste. Il se traduit par une relative « stabilité » spatiale où les transformations relèvent plus d'une évolution des pratiques d'exploitation agricole que d'une modification radicale (Laques, 2003). L'arrière-front se caractérise notamment par une forte concentration de terres due au développement d'une agriculture capitaliste. Celle-ci, plus inégalitaire et moins demandeuse en hommes, reproduit les facteurs propices à de nouvelles migrations et donc à l'ouverture de nouveaux fronts. Ce front est également appelé « *hollow frontier* » (Sawyer, 1984).

¹ En 2007, des activités illégales de déboisement menées par des bûcherons de Feliz Natal ont été repérées au sein même du parc indigène du Xingu.

² Le gouverneur du Mato Grosso, Blairo Maggi, a envoyé une lettre ouverte au ministre de la justice le 31/02/2003 demandant un moratoire de deux ans sur les futures créations de terres indigènes. Il considère que les amérindiens disposent d'ores et déjà d'une proportion suffisante (20%) du territoire du Mato Grosso (Le Tourneau, 2006).

Alors qu'il est commun de voir la présence de l'agriculture capitaliste en arrière des fronts pionniers, une des particularités du front pionnier amazonien est liée à la présence des classes capitalisées également sur l'avant-front, dans le cadre du front spéculatif. L'agriculture paysanne se retrouve ainsi « comprimée » entre deux fronts capitalistes : (i) un front en arrière qui les pousse à migrer et à ouvrir d'autres fronts et (ii) un front en avant qui, en spéculant sur les terres, ferme la frontière et freine justement le développement de nouveaux fronts par l'agriculture paysanne (Sawyer, 1984).

Cette situation débouche inévitablement sur la création de nombreux conflits. Théry (1996) propose même de mesurer l'avancée du front pionnier à partir des statistiques d'homicides liés à des conflits fonciers. Effectivement, les statistiques de la criminalité de 2004 indiquent que les deux villes les plus violentes du Brésil étaient situées sur le front pionnier mato-grossense : Colniza et Juruena avec respectivement 165,3 et 137,7 homicides pour 100000 habitants¹.

Pour les paysans refusant le conflit et ne trouvant pas d'espace à occuper sur le front, il ne reste plus qu'à rejoindre les villes et alimenter ainsi le *front urbain* qui avance au cœur du front pionnier. L'exode rural et la forte urbanisation qui en découle (69% de la population habitait en ville en 2000 selon l'IBGE) est une caractéristique essentielle du front pionnier amazonien. Cette urbanisation se retrouve dans les trois composantes paysagères du front pionnier. Dans les années 1970, les villes étaient construites en avant du front pour attirer de nouveaux migrants dans le cadre d'une colonisation privée menée par des sociétés immobilières du sud du pays. Elles servaient alors de base de lancement pour débiter l'exploitation du milieu environnant et initier l'ouverture d'un nouveau front pionnier. Les villes de Sinop ou de Juina (fig. 1.8) au Mato Grosso sont un cas marquant de ce type de conquête spatiale. Après l'ouverture du front, la croissance démographique se poursuit et les villes de la frange pionnière et de l'arrière front s'agrandissent. Elles attirent alors des agro-industries profitant de la présence d'une main d'œuvre bon marché et de matières premières en grande quantité. Indirectement, cette urbanisation grandissante participe à la progression du front d'ouverture. Elle représente en effet de nouveaux marchés pour les produits agricoles issus de l'agriculture traditionnelle qui sont destinés à la commercialisation locale. Le développement de cette agriculture paysanne attire alors de nouveaux migrants. Ainsi, pour rester dans le vocabulaire militaire des fronts, les centres urbains servent à la fois de bases avancées sur le front pour initier la colonisation, et de bases arrières pour soutenir l'expansion du front et assurer son repli en accueillant les colons en situation d'échec.

¹ <http://www.amazonia.org.br/noticias/noticia.cfm?id=235782>

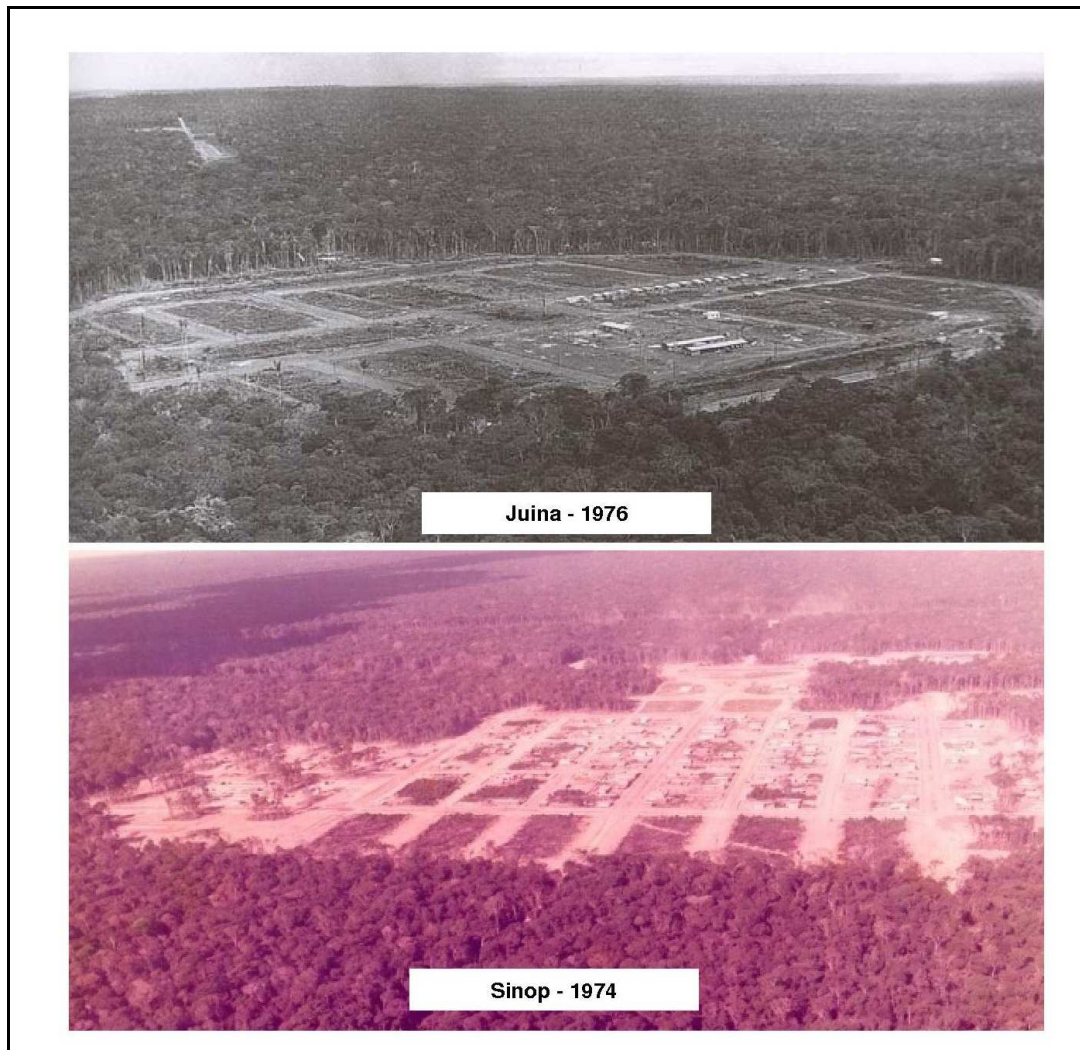


Figure 1.8 : Photographies aériennes des villes de Juina (Siqueira, 2002) et Sinop (Colonizadora Sinop) lors de leur construction.

3. La frontière agricole : le principal moteur du front pionnier

C'est dans la frange pionnière que se produisent les principaux changements d'occupation et d'utilisation du sol. Qualifier et quantifier son expansion constitue l'enjeu principal des recherches géographiques en Amazonie. Il est donc nécessaire d'analyser plus précisément la frontière agricole qui la constitue pour comprendre ses mécanismes. Les deux modes de production agricole qui la composent (agriculture paysanne ou capitaliste) répondent à des logiques différentes mais complémentaires qui entraînent des formes d'occupation de l'espace diversifiées. Comprendre l'évolution de la frontière agricole et de son organisation spatiale à une échelle régionale implique donc de comprendre l'évolution d'une exploitation à l'échelle locale. Cela permet alors de différencier les différents types de frontières agricoles à l'échelle régionale.

3.1. Des exploitations agricoles dynamiques

3.1.1. Le cycle de vie d'une exploitation agricole

L'organisation de l'espace à l'échelle de l'exploitation agricole varie au cours de son cycle de vie (fig. 1.9). Ce cycle diffère peu selon le mode de production (traditionnel ou capitaliste) puisque l'objectif à plus ou moins long terme est le même : produire plus pour vendre plus. Or, sur les fronts pionniers et en Amazonie plus particulièrement, produire plus implique généralement d'agrandir les exploitations. La différence va alors surtout se faire sur le nombre d'étapes, et donc le temps, nécessaires pour achever le cycle.

A l'échelle de l'exploitation agricole, le stade du cycle de vie (et l'organisation de la production dans l'espace qui lui est associée) évolue en fonction du rapport entre la production destinée à la consommation des habitants de l'exploitation et la production destinée à la commercialisation (Summers, 2008). Pour Walker et Homma (1996), ce rapport est lié (i) aux conditions économiques externes et (ii) aux caractéristiques de la famille occupant l'exploitation. Ces caractéristiques incluent notamment (i) le rapport entre le nombre d'adultes en âge de travailler et le nombre de personnes de la famille pour les petites exploitations et (ii) le capital initial à investir pour les grandes exploitations qui va définir par exemple le nombre de salariés pour la fazenda.

Le cycle de vie de l'exploitation agricole s'effectue en plusieurs étapes (fig. 1.9):

- (1) Les nouveaux migrants arrivant sur une parcelle de végétation naturelle commencent par défricher une partie de leur lot. Pour les grands propriétaires (1.1), le déboisement de la parcelle se fait rapidement. Les nouvelles techniques de déforestation avec une chaîne de 100 m tractée par des bulldozers permettent à 5 hommes de défricher 40 hectares en une journée (Droulers, 2004). Cela permet de pouvoir commencer à produire rapidement de manière rentable. Le délai entre le déboisement et l'exploitation de la parcelle (en cultures ou en pâturage) est court : un à deux ans.

- Pour les petits producteurs (1.2), la déforestation est plus lente. Elle permet surtout de pouvoir revendiquer la possession de la terre et de commencer à mettre en place une production de subsistance. (2) Au cours du temps, la structure de la famille change avec l'arrivée d'enfants à nourrir. La croissance familiale nécessite d'augmenter la part de production pour la consommation, limitant ainsi la production dédiée à la commercialisation. (3) Après quelques années, les enfants arrivent à l'âge adulte et les sols s'épuisent. Un premier tournant dans le cycle de vie de l'exploitation s'impose. Deux alternatives sont possibles :

- (3.1) la famille quitte sa terre pour recommencer un cycle plus en avant sur le front pionnier. L'abandon de la terre peut se faire de manière forcée (les grands producteurs s'appropriant la terre et forçant les anciens occupants à fuir) ou selon les règles imposées par le marché foncier (Walker et Homma, 1996). Dans ce dernier cas, le petit producteur revend sa terre qui constitue son unique capital pour racheter une terre plus grande en avant du front pionnier. En fait, les lots sont même fréquemment défrichés dans le but avoué de le revendre à un producteur mieux capitalisé cherchant à étendre son exploitation (Walker et Homma, 1996). Ceci est dû au fait que l'issue économique la plus avantageuse à court terme pour les petits producteurs est souvent la vente du lot plutôt que la vente de produits agricoles (Droulers, 2004).

- (3.2) l'augmentation de travailleurs au sein de la ferme augmente. Les défrichements s'accroissent et la production s'accroît. Elle s'oriente alors vers la production de produits destinés à la commercialisation sur les marchés locaux.

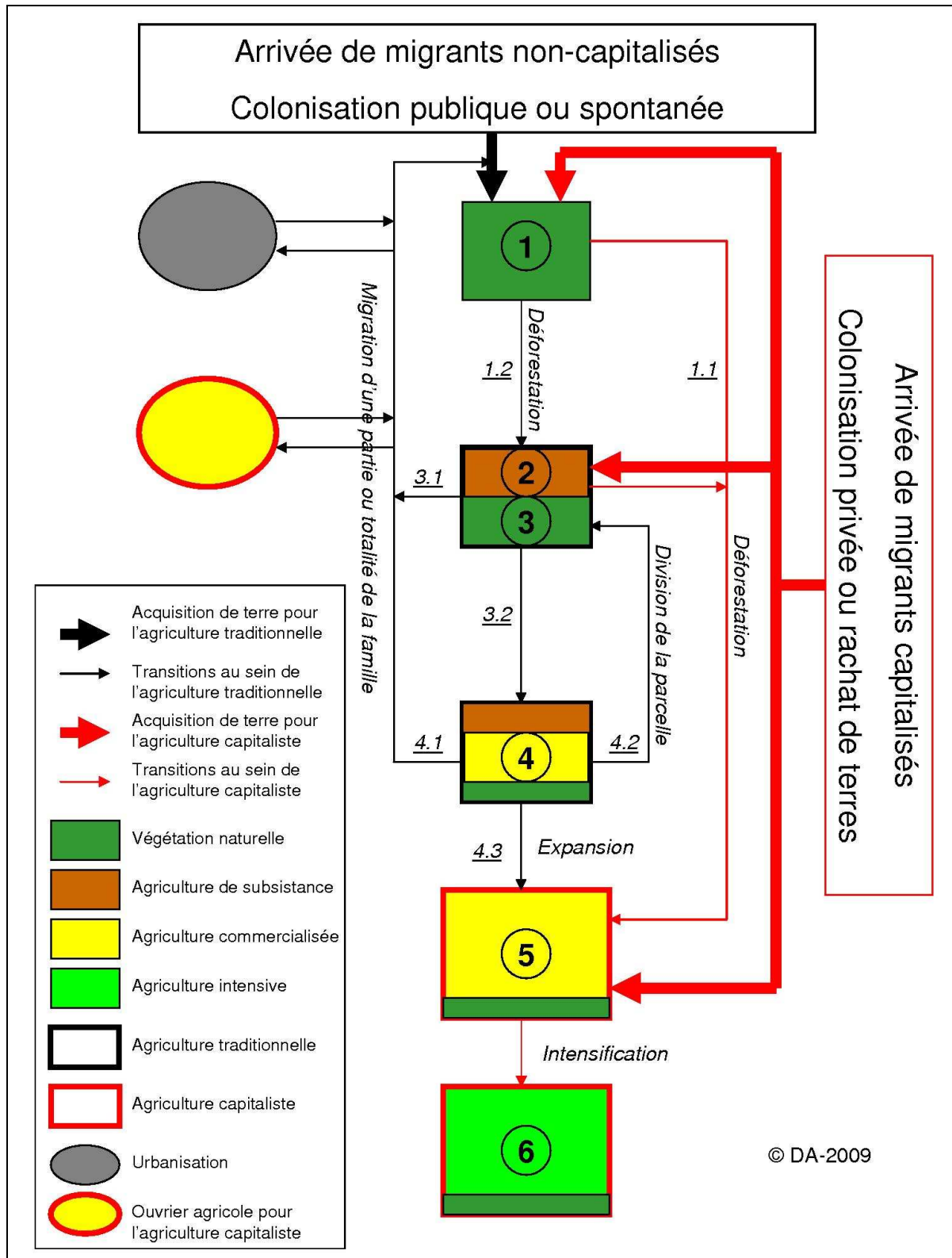


Figure 1.9 : Cycle de vie d'une exploitation agricole. Les chiffres correspondent aux chiffres présentés dans le texte.

L'alternative choisie relève de la situation d'échec ou de succès dans laquelle se trouve le groupe familial. Cette situation dépend de facteurs familiaux et économiques résumés par Léna (1986) et Coy (1996) :

- le capital de départ : par exemple, les paysans sans terre du nord-est et les producteurs légèrement capitalisés du sud n'ont pas les mêmes chances de succès; les paysans installés dans des projets de colonisation publique bénéficient également de crédits à l'installation dont ne bénéficient pas les colons installés spontanément ;
- endettement et dépendance par rapport aux intermédiaires ;
- tendances des marchés et des prix pour les produits agricoles ;
- l'expérience antérieure : tous les migrants n'ont pas les compétences pour gérer une exploitation agricole en Amazonie ;
- la structure de la famille : le nombre de personnes aptes à travailler sur la nouvelle terre est lié à la taille de la famille ;
- les facteurs socio-culturels : selon leurs régions d'origine, les migrants ont des pratiques culturelles plus ou moins adaptées aux réalités amazoniennes ;
- potentiel de production sur le front pionnier ;
- conflits d'intérêts, concurrence de l'utilisation de l'espace.

(4) Lorsque la famille décide d'agrandir son exploitation, le cycle de vie se poursuit. La famille continue de croître avec des nouveaux mariages et de nouvelles naissances. Quand la taille de l'exploitation ne supporte plus le nombre de personnes y résidant, trois alternatives se présentent (Summers, 2008) :

- (4.1) la famille se divise : une partie reprend la ferme et une autre migre. Ces nouveaux migrants vont alors (i) rejoindre les villes participant à l'urbanisation, (ii) travailler en tant qu'ouvriers agricoles dans les exploitations capitalistes ou (iii) s'installer plus loin sur le front pionnier et recommencer un cycle.
- (4.2) la famille se partage la terre, à condition que celle-ci soit suffisamment grande ;
- (4.3) la famille acquiert de nouvelles terres.

(5) Si cette dernière option est choisie, le groupe familial s'oriente alors résolument vers un mode de production capitaliste orienté vers les marchés régionaux, nationaux ou internationaux. Ce mode de production indique un changement de classe sociale de la part du producteur qui se rapproche du mode de production des grands producteurs. Ce changement nécessite un investissement initial conséquent en machines agricoles, semences, fertilisants... La situation de l'exploitation est donc fragilisée durant une certaine période. En cas de mauvaise récolte (liée à des mauvaises conditions ou à une baisse des prix des produits agricoles), le groupe familial peut alors faire faillite. L'exploitation est alors rachetée (ou louée) par d'autres *fazendeiros* qui cherchent à étendre leur exploitation.

(6) Après quelques récoltes, l'exploitation se stabilise et conforte son mode de production agricole. Pour assurer le bon développement de son exploitation, l'agriculteur cible ses efforts vers l'intensification de la production pour augmenter les revenus. Cette étape représente la pérennisation de l'exploitation sur le long terme.

Le cycle de vie de l'exploitation entraîne la formation de paysages agricoles régionaux caractérisés par une augmentation de la concentration foncière qui se décompose en deux mouvements concomitants : (i) des expulsions et ré-installations de petits producteurs et (ii) une concentration d'exploitations (Droulers, 2004). Cette concentration s'explique par un retrait brutal du gouvernement de la sphère agricole avec une suppression des programmes

d'appui à l'agriculture et la fin des prix minimums garantis pour les produits de base (Droulers, 2004).

3.1.2. Des organisations spatiales diverses

L'évolution du cycle de vie d'une exploitation indique que les deux modes de production (traditionnel ou capitaliste) convergent vers la formation d'un type unique de paysage où la forêt n'occupe plus qu'un maigre espace au milieu des pâturages ou des cultures (Dubreuil *et al.*, 2008). Cependant, les échelles considérées ne sont pas les mêmes et l'organisation spatiale des exploitations varie selon le mode de colonisation initiale (public, spontané ou privé) (fig. 1.10).

La colonisation publique est coordonnée par l'INCRA qui installe les colons au sein d'*assentamentos* (lotissements agraires). Des routes vicinales parallèles sont ouvertes à intervalles réguliers dans la forêt et les colons gagnent un lot rectangulaire (entre 50 et 100 ha en général) le long de ces routes. Ils commencent alors à défricher leur lot à partir de la route en avançant toujours plus vers le fond de leur parcelle. Ils doivent cependant laisser une partie en forêt. Ainsi, ils ne rejoignent pas les défrichements amorcés par un autre producteur à partir d'une autre route sur une parcelle mitoyenne. Il reste donc généralement une bande forestière entre les parcelles défrichées. Le terme d'organisation en « arêtes de poisson » est souvent employé pour définir les paysages de ce type de colonisation (exemple 1 de la figure 1.10).

La colonisation spontanée est caractérisée par des parcelles légèrement plus grandes et une organisation moins géométrique. L'occupation de l'espace se fait de manière plus désordonnée, tout en restant le long des routes existantes (exemple 2 de la figure 1.10).

La colonisation privée est l'œuvre des grands producteurs. Les défrichements sont plus rapides et plus grands avec des parcelles souvent supérieures à 100 hectares. Ces parcelles sont de formes géométriques et forment une structure réticulée dans le paysage. Bien souvent, les exploitations sont exploitées à leur maximum et seules les berges des cours d'eau sont conservées en forêt (exemple 3 de la figure 1.10).

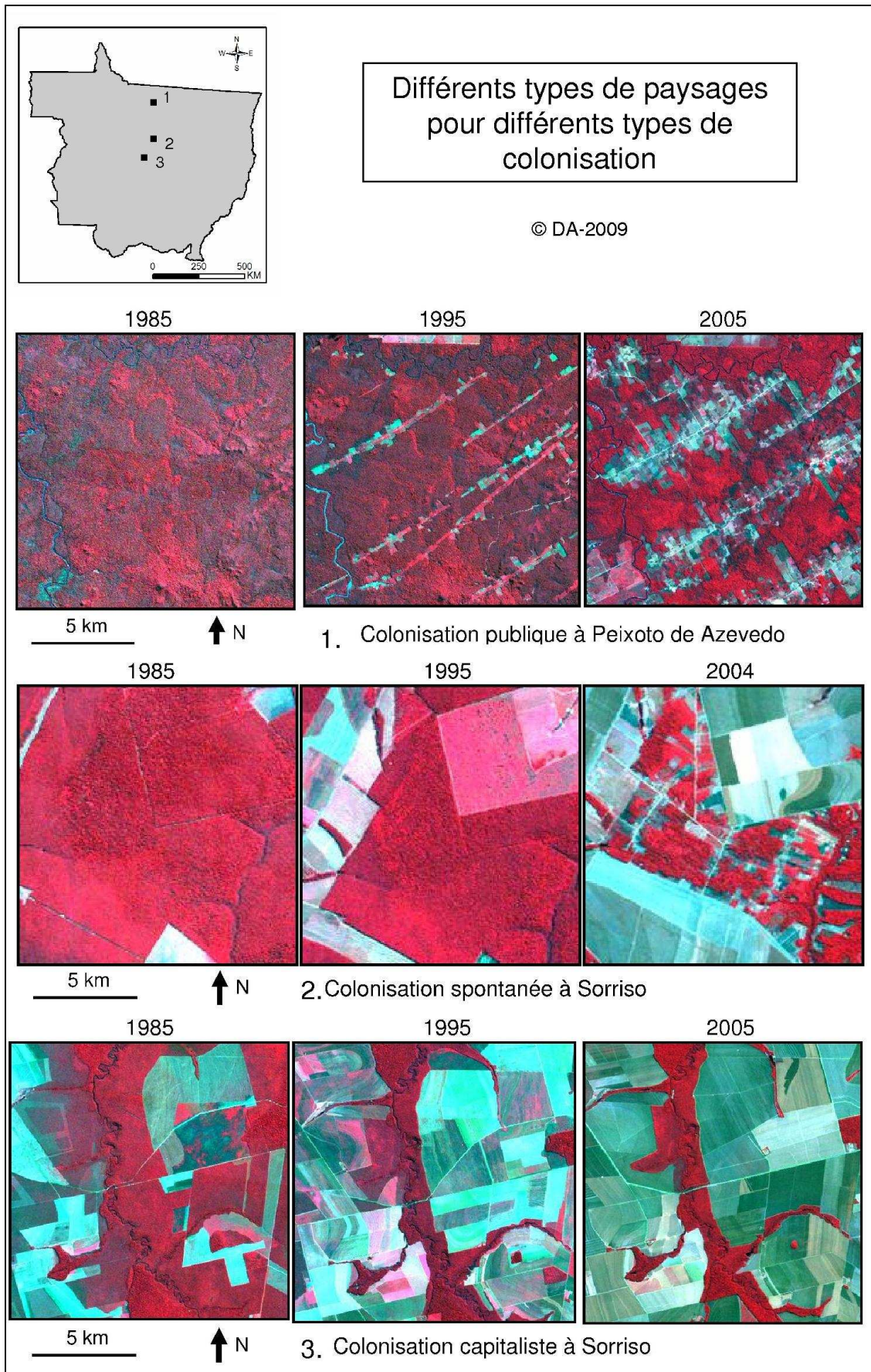


Figure 1.10 : Présentation de différents types de paysages correspondant à différents types de colonisation agricole (images Landsat).

3.2. De l'exploitation agricole à la frontière agricole

L'évolution du cycle de vie des exploitations agricoles et des structures agraires correspondantes permet de caractériser des stades d'évolution de la frontière agricole à l'échelle régionale.

3.2.1. Les phases d'évolution de la frontière agricole

Coy (1996) a présenté un modèle du cycle de vie des fronts pionniers qui reprend les grandes étapes observées dans le cycle de vie des exploitations agricoles (figure 1.11). La première étape correspondant à l'arrivée des colons est définie comme une phase d'occupation (Coy, 1996) ou d'installation (Albaladejo *et al.*, 1996). Cette phase se caractérise par une arrivée massive de petits producteurs qui commencent à exploiter des terres de petites superficies (50 à 100 ha dans le cadre de la colonisation publique ou spontanée). Après les premiers défrichements, l'agriculture de subsistance prédomine largement avec des cultures de riz, manioc, maïs...

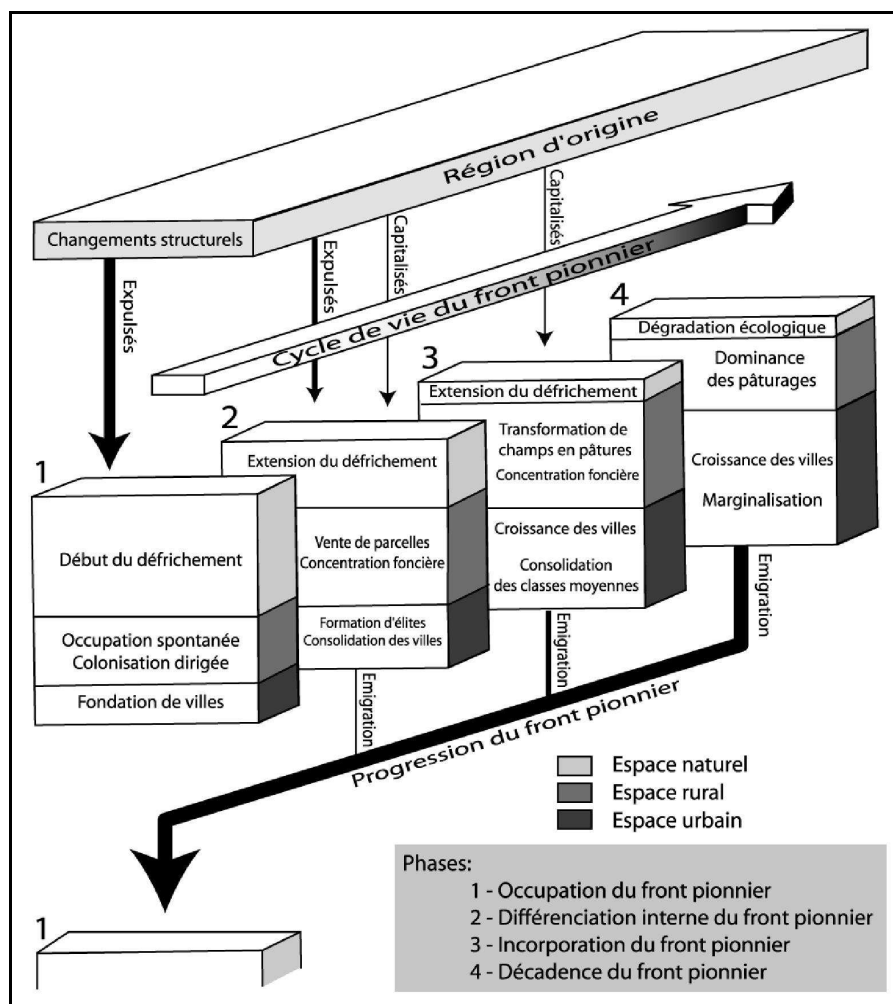


Figure 1.11 : Modèle de cycle de vie du front pionnier (Coy, 1996). N.B. : Ce modèle a été réalisé à partir de l'analyse du front pionnier au nord du Mato Grosso, où l'activité capitaliste dominante est l'élevage et non l'agriculture. Dans ce cas, pour l'auteur, la dernière phase du front pionnier se caractérise par une dégradation écologique et socio-économique. Cette théorie peut être remise en cause dans le cas du front pionnier du soja puisque les communes de production de soja restent des modèles de développement socio-économique à l'échelle régionale, même après le passage du front pionnier. Ce développement est rendu possible par une phase de revitalisation, décrite dans le texte.

L'abandon de la terre ou l'augmentation des superficies cultivées pour faire face à la croissance démographique au sein des exploitations s'insèrent dans une phase de différenciation interne (Coy, 1996). Cela correspond à une stratification de la société rurale entre acteurs gagnants et perdants. Les acteurs perdants migrent tandis que les acteurs gagnants restent et modifient leurs pratiques culturelles pour s'orienter vers la production de cultures commerciales. Ils participent à la consolidation (Albaladejo *et al.*, 1996) de l'espace qui devient entièrement occupé et productif. Même si l'agriculture traditionnelle persiste majoritairement, elle n'est plus destinée à la subsistance mais à la production de biens pour les sociétés locales. Elle s'intègre donc dans l'économie capitaliste en place sur le front. Les villes prennent aussi de l'importance notamment avec l'arrivée d'administrations.

L'agrandissement constant des exploitations débouche sur le développement de l'agriculture capitaliste extensive qui fait partie d'une stratégie d'incorporation (Coy, 1996) ou d'intégration (Albaladejo *et al.*, 1996). Les disparités se durcissent entre *minifundios* et *latifundios*. Beaucoup de colons doivent migrer, participant ainsi à la forte urbanisation qui touche l'Amazonie. Les villes grandissent et la conquête de l'espace se stabilise, permettant au territoire d'acquiescer un rôle dans l'espace national. L'augmentation de la concentration foncière et le manque d'espaces libres à ouvrir empêchent l'expansion spatiale de l'agriculture. Pour assurer son développement économique, le secteur rentre alors dans une phase de revitalisation (Henkel in Summers, 2008) basée sur l'intensification de la production. Cette phase consiste à intégrer plus de main d'œuvre et d'améliorations technologiques afin d'augmenter la production. Ceci est rendu possible par l'utilisation du capital accumulé au cours des phases précédentes. Au cours de cette phase, les superficies cultivées peuvent baisser tout en maintenant des niveaux de production équivalents ou supérieurs (DeFries *et al.*, 2004). Cela permet d'atténuer la pression de l'expansion de la frontière sur les zones forestières et même de créer des nouvelles aires protégées et des aires de loisirs. Ce phénomène s'observe déjà à l'échelle brésilienne puisque Théry et de Mello (2005) notent une baisse des superficies cultivées de 19% entre 1985 et 1996 : cette baisse s'accompagnant de la création de nombreuses réserves environnementales et indigènes à partir des années 1980. Toutefois, la situation est complexe car ce constat valable à l'échelle nationale ne l'est pas forcément à l'échelle régionale, où les réserves protégées sont souvent perçues comme un frein au développement¹.

Les différentes phases de la frontière agricole participent toutes au processus de différenciation des classes sociales du front qui entraîne la migration d'une partie de la population en échec vers les villes ou l'avant front. Cela fait ressortir une caractéristique principale des sociétés pionnières : la mobilité. La population migrante constitue en effet une main d'œuvre mobile composée de travailleurs temporaires et permanents (Becker, 1986). Les facteurs explicatifs de cette mobilité se rapprochent de ceux menant les colons à une situation d'échec. Théry (2006) distingue cinq facteurs :

- la rapidité d'épuisement des sols qui poussent les colons à migrer toujours plus loin dans la forêt à la recherche de nouvelles terres ;
- les oscillations des prix des produits commercialisés qui influent sur la main d'œuvre nécessaire selon les périodes ;
- les incertitudes des marchés des intrants ;
- l'inorganisation du crédit agricole ;

¹ Mais ce point de vue est en train de changer comme nous le verrons au chapitre 4.

- la mentalité pionnière marquée par un goût du risque et une passion du jeu et de la spéculation.

On peut aussi ajouter le rôle de la situation foncière incertaine qui y règne. En effet, un titre de propriété est acquis lorsque la parcelle est exploitée, i.e. déboisée. Mais ce titre peut être retiré si quelqu'un revendique la terre avec un titre en bonne et due forme, l'exploitant se retrouve alors expulsé (Droulers, 2004).

3.2.2. *L'organisation spatiale de la frontière agricole au cœur du front pionnier*

La frontière agricole fait partie intégrante du front pionnier, l'agriculture étant l'activité économique principale au sein de la frange pionnière et de l'arrière-front. Cependant, l'étude des phases de l'évolution de la frontière agricole indique que celle-ci est elle-même composée de plusieurs fronts. Ces fronts successifs se démarquent par des types d'utilisation du sol qui leurs sont propres (DeFries *et al.*, 2004).

On distingue tout d'abord deux fronts principaux menés par les deux classes sociales d'agriculteurs (petits producteurs familiaux ou les *fazendeiros*) répondant à des dynamiques d'expansion liées. Selon les théories de pénétration capitaliste présentée par Summers (2008), la progression du front mené par les petits producteurs constitue un « *front d'ouverture* » dont l'avancée est directement liée à l'arrivée de nouveaux migrants. Cette théorie est notamment défendue par Boserup (1970) pour qui la croissance démographique est le premier moteur de la déforestation et donc de l'avancée du front pionnier. L'agriculture capitaliste se situe en arrière de ce front, au sein d'un « *front économique* » ou « *front commercial* ». Ce front évolue en fonction de la rentabilité des produits agricoles cultivés qui dépend du prix de vente, des coûts de production, de la taille des exploitations et des coûts de transport. Selon Hecht (2005), "*Under the new neoliberal regimes, markets rather than the state would drive development forward in the most efficient manner* ». Ainsi, l'évolution de ce front est liée à des mécanismes globaux (cours mondiaux des produits agricoles et taux de change par exemple) et régionaux (le prix de la terre est un déterminant de la taille des exploitations, les constructions de routes par l'Etat permettent de réduire les coûts de transport...). En conséquence des oscillations de la conjoncture économique, le front capitaliste n'avance pas de manière constante mais il progresse ou se rétracte suivant la variabilité de ces mécanismes économiques globaux et régionaux.

Lorsqu'il est en phase d'expansion, le front économique progresse en rachetant les parcelles abandonnées par les petits producteurs suite à la baisse de fertilité des sols. Ces producteurs rejoignent alors les villes participant à l'exode rural paradoxalement caractéristique des fronts amazoniens (Becker, 1986 ; Becker, 2001) ou ils alimentent le front d'ouverture en allant tenter leur chance plus en avant sur le front. Les situations de conflits se créent lorsque les deux fronts se rapprochent, les grands producteurs souhaitant récupérer les terres de petits producteurs ne désirant pas s'en aller. Malgré les nombreux conflits existants entre ces deux modes de production, ils n'en sont pas moins complémentaires. En effet, l'agriculture capitaliste tournée vers la production à grande échelle pour l'exportation ne peut exister sans la présence de la petite agriculture familiale. Celle-ci participe au développement capitaliste de deux manières : (i) en produisant la nourriture pour les marchés locaux ; et (ii) en fournissant de la main d'œuvre à bas prix pour l'agriculture capitaliste.

En arrière du front économique, un *front d'intensification* progresse lorsqu'il ne reste plus de nouvelles terres à exploiter ou à racheter pour assurer l'expansion du front

économique. Ce front correspond à la phase de revitalisation de la frontière agricole. Cependant, même si l'agriculture intensive capitaliste domine largement, une certaine agriculture traditionnelle se maintient pour la production de denrées destinées aux marchés locaux. Enfin, outre l'agriculture intensive, l'arrière-front se caractérise également par une forte urbanisation de l'espace et un certain recul de l'espace agricole au profit des aires protégées.

Chaque phase de l'avancée du front se caractérise par un paysage qui lui est propre. Clairay (2005) évalue le stade pionnier en fonction du pourcentage de végétation naturelle conservée sur un espace donné. Pour elle, la disparition de la forêt se fait en six stades :

- le stade de continuité, où la forêt recouvre 100% de l'espace étudié ;
- le stade de discontinuité absolue, où moins de 10% de l'espace a été défriché ;
- le stade de discontinuité relative, où moins de 50% de l'espace a été défriché ;
- le stade d'occupation alternée, où moins de 75% de l'espace a été défriché ;
- le stade de quasi-continuité, où moins de 90% de l'espace a été défriché ;
- le stade de continuité, où moins de 10% de la forêt a été conservée.

DeFries *et al.* (2004) présentent une méthode d'analyse comparable mais plus élaborée car elle prend en compte la superficie occupée par différents types d'utilisation du sol (forêt, agriculture, urbain et aires protégées) dans un espace donné. La figure 1.12 présente une adaptation de ce modèle au cas du front pionnier amazonien. La proportion de chaque type d'utilisation du sol dans le paysage y est mise en rapport avec une phase d'évolution du front pionnier. Il convient d'apporter quelques précisions pour comprendre ce schéma (Mustard *et al.*, 2004) :

- ***Les transitions entre ces phases ne sont pas unidirectionnelles.*** Le front peut en effet reculer. Par exemple, si un producteur traditionnel abandonne sa terre à cause du manque de fertilité, de la forêt secondaire peut repousser sur la parcelle. De même, selon la conjoncture économique, un *fazendeiro* peut choisir de ne pas semer certaines parcelles de manière intensive comme il le fait généralement. Enfin, des désappropriations de grandes fazendas par les pouvoirs publics peuvent entraîner un retour du front économique vers le front d'ouverture avec l'arrivée de petits producteurs.
- ***Toutes les phases ne sont pas forcément vécues par un espace donné.*** Par exemple, une réserve protégée restera toujours (à priori) au stade de pré-colonisation. La remarque vaut également pour les forêts exploitées de manière durable¹ qui sont destinées à rester en forêt.
- ***Les phases ont des durées variables.*** Par exemple, une conversion de forêt en culture mécanisée peut se faire en moins de deux ans si la parcelle est défrichée par le *fazendeiro* lui-même. Par contre, si un *fazendeiro* rachète une terre abandonnée par un producteur traditionnel, la conversion de forêt en culture mécanisée dure plus longtemps.

Ce dernier point implique que la durée du passage d'un paysage de pré-colonisation vers un paysage stabilisé est variable. Selon Coy (1996), les fronts pionniers du sud du Brésil du début du 20^{ème} siècle ont mis entre 30 et 35 ans pour se stabiliser. Dans les années 1950,

¹ Manejo Florestal Sustentavel

les fronts du centre méridional se sont refermés en 20-25 ans. Aujourd'hui, le cycle des fronts pionniers amazoniens ne semble durer que 15 ans tout au plus. Il existe donc une forte accélération des changements d'occupation du sol qui sont liés à des enjeux démographiques (la transition démographique n'est pas encore terminée au Brésil), environnementaux (la déforestation continue avec de nouvelles technologies), économiques (les producteurs capitalistes profitent de nouvelles technologies pour rester compétitifs sur les marchés internationaux) et sociaux (accentuation des conflits entre classes sociales).

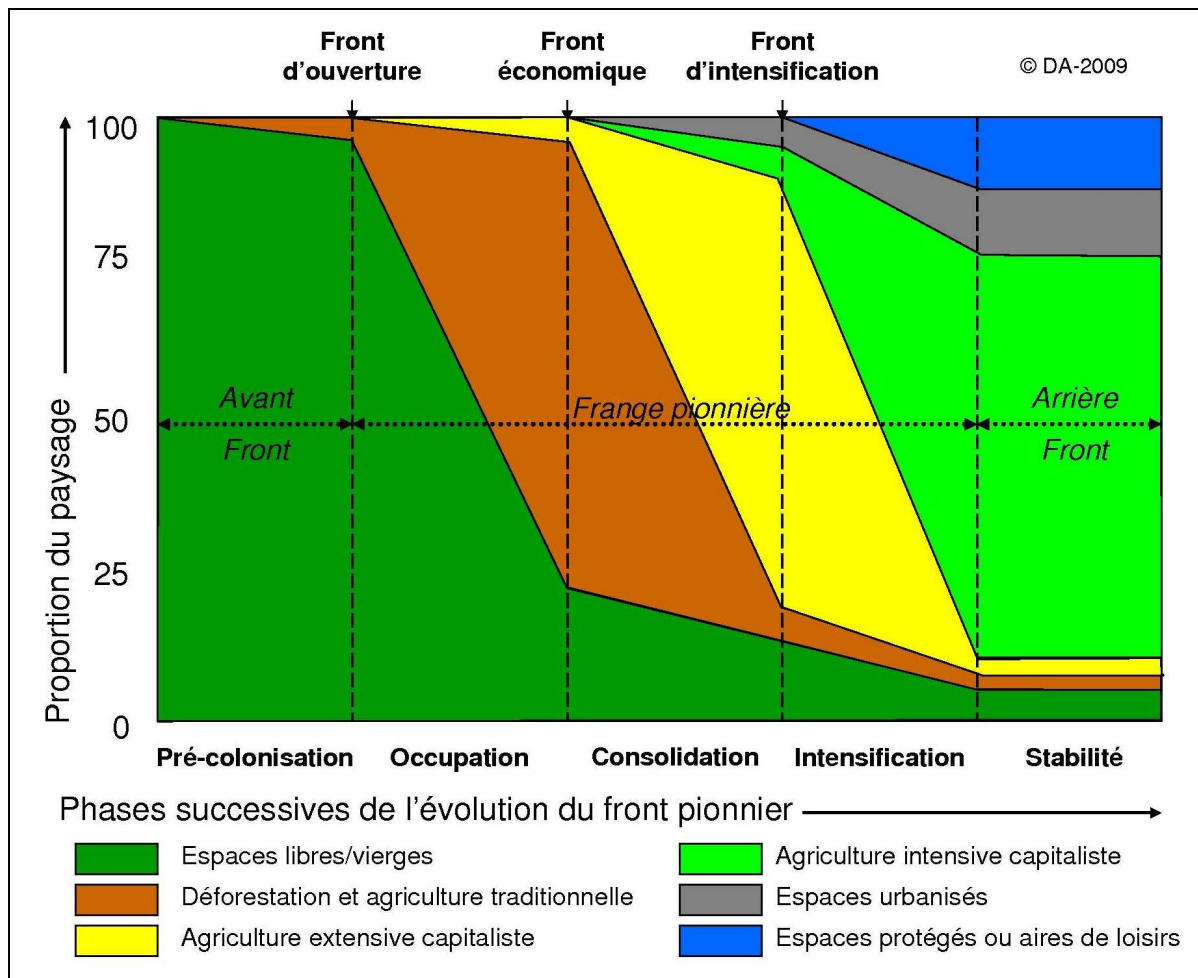


Figure 1.12 : Evolution spatio-temporelle du front pionnier (adapté de DeFries *et al.*, 2004).

4. Conclusion

Le front pionnier s'organise de manière complexe, impliquant des groupes sociaux diversifiés et des modes d'occupation de l'espace variés. Il n'existe donc pas deux fronts identiques en Amazonie. Tous les fronts sont uniques. Leurs seuls points communs résident en fait dans les contradictions qui les caractérisent (Becker, 1986).

L'action de l'Etat en Amazonie est contradictoire puisqu'il cherche à assurer le développement économique de l'Amazonie en construisant les infrastructures qui permettront son exploitation tout en essayant de la préserver. De plus, en cherchant à résoudre les conflits agraires des autres régions du pays, l'Etat a simplement déplacé le problème vers l'Amazonie en l'aggravant. Les migrants se retrouvent confrontés aux mêmes inégalités et aux mêmes conflits vécus dans leurs régions d'origine, mais de manière accentuée comme le montrent les

chiffres de la criminalité. Plus généralement, le front pionnier peut être considéré dès son origine comme étant le fruit d'un échec de la politique sociale brésilienne. L'apparition du front pionnier a été incitée par l'Etat pour ne pas avoir à effectuer de réforme agraire à proprement parler dans les régions de colonisation ancienne (Becker, 1986 ; Foucher, 1991).

Les contradictions entre classes sociales sur le front sont fortes, notamment entre les petits et les grands producteurs. Les seconds forcent parfois les premiers à poursuivre l'ouverture de la frontière tout en organisant sa fermeture en spéculant sur les terres de l'avant-front. Enfin, pour les migrants, la vie sur le front est synonyme d'espoir mais peut vite se transformer en échec. Dans ce dernier cas, les migrants alimentent alors la forte urbanisation des fronts amazoniens qui est une autre contradiction pour une frontière qui est surtout agricole.

L'évolution de cette frontière agricole s'effectue en trois phases : (i) une phase d'installation de l'agriculture traditionnelle, (ii) une phase d'installation de l'agriculture capitaliste et (iii) une phase d'intensification agricole. Ces deux dernières phases sont menées par les grands producteurs de soja et leur différenciation n'est pas aisée. En effet, l'agriculture capitaliste a toujours cherché à produire de manière intensive, même si les superficies concernées sont grandes. Cependant, la forme d'intensification vers laquelle se tourne l'agriculture mondiale et brésilienne aujourd'hui se veut différente. Il convient donc de définir ce que l'on entend par agriculture capitaliste et agriculture intensive dans cette thèse.

Chapitre 3. L'intensification agricole : de la « Révolution Verte » à l'intensification écologique

1. Introduction

La problématique de l'intensification agricole est d'échelle mondiale : comment nourrir une population toujours grandissante ? Entre 1960 et 2000, la population est passée de 3 à 6 milliards de personnes (FAOSTAT). Cette croissance a nécessité d'augmenter considérablement la production de produits alimentaires. Depuis 1980, les productions de viande et de fruits et légumes se sont accrues de 91% et 120% respectivement. La production de céréales a augmenté de 44% à l'échelle mondiale (fig. 1.13) et Tilman (1999) précise qu'elle a doublé depuis 1960.

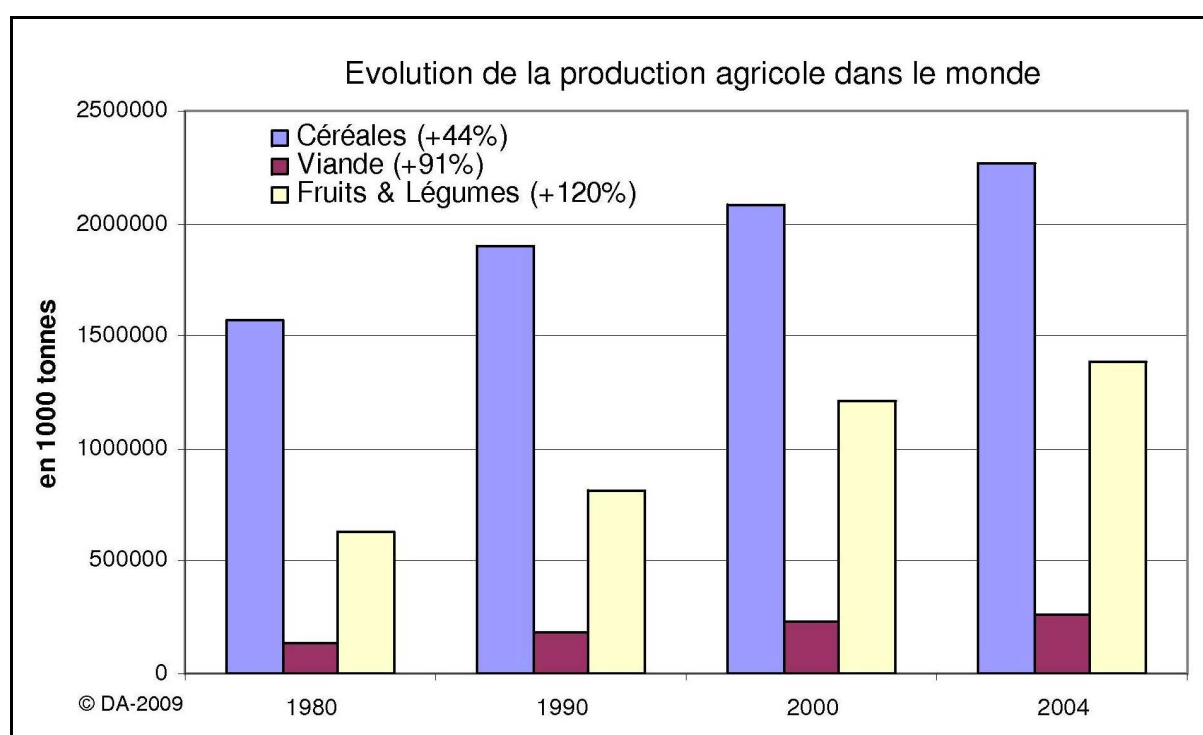


Figure 1.13 : Evolution de la production agricole mondiale entre 1980 et 2004 (Source : FAOSTAT).

En fait, la production agricole s'est accrue plus rapidement que la population ce qui a permis d'augmenter de 19% la consommation par personne dans le monde entre 1965 et 2000 (2,720 kcal/jour en 1996), et de 32% dans les pays en développement (2,530 kcal/jour en 1996) (Alexandratos, 1999). Malgré tout, il reste encore 800 millions de personnes mal nourries dans le monde aujourd'hui (figure 1.14). Or les démographes prévoient à présent que la population devrait atteindre 10 milliards d'individus à la moitié du 21^{ème} siècle (Matson *et al.*, 1997). Cette population devrait multiplier ses revenus moyens par 2,4 d'ici à 2050, impliquant des changements diététiques tournés vers la consommation de viande, laquelle est en grande partie nourrie de grains (Tilman *et al.*, 2002). Nourrir une telle population implique de parvenir à doubler de nouveau la production de grains entre 2000 et 2050 (Tilman, 1999 ; Tilman *et al.*, 2002). Pour relever ce défi colossal, le secteur agricole mondial a donc deux alternatives : mettre en valeur de nouvelles terres et/ou poursuivre ses efforts d'intensification de la production.

En marge de ce défi agricole, les questions en jeu sont aussi économiques et sociales. Il s'agit en effet de lutter contre la pauvreté et donc contre les tensions sociales¹. L'humanité produit aujourd'hui potentiellement assez d'aliments pour nourrir le monde et si la faim existe encore à l'échelle globale, c'est surtout la pauvreté qui en est la cause. Ainsi, outre l'accroissement de la production, la baisse de la malnutrition observée au 20^{ème} siècle a également été rendue possible par des échanges internationaux accrus. Les pays en développement ont notamment amplifié leurs importations de denrées alimentaires. Toutefois, à une échelle plus locale, il existe toujours un réel problème de production et d'efficacité agricole auquel il faut apporter des réponses. L'intensification agricole représente donc la première étape vers une réduction de l'insécurité alimentaire, de la dépendance excessive des pays importateurs et de la pauvreté (Alexandratos, 1999).

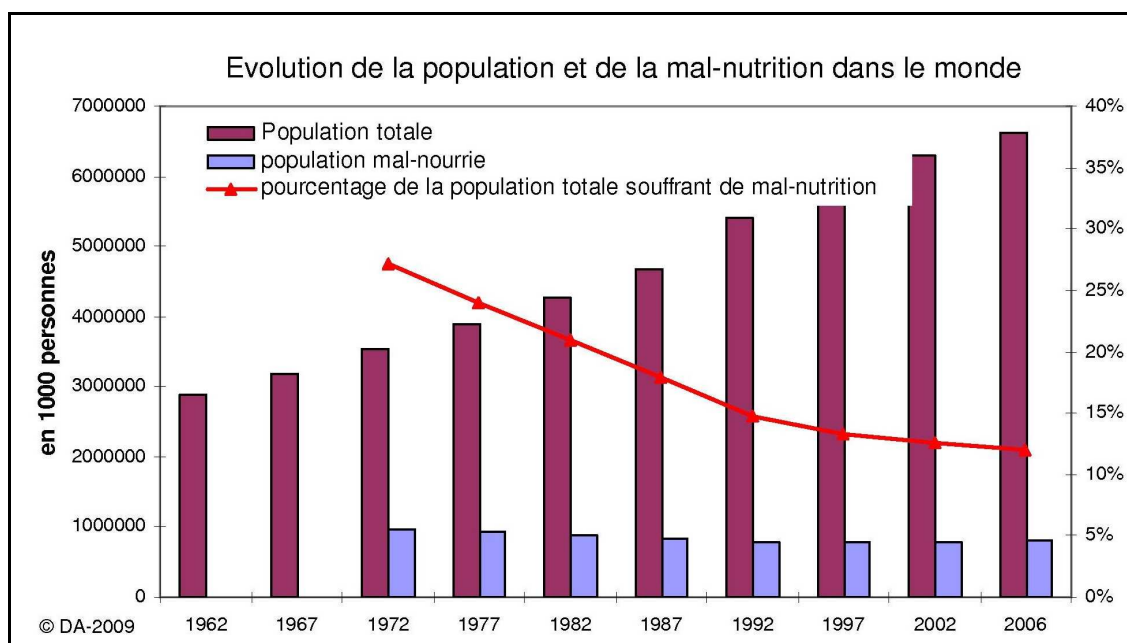


Figure 1.14 : Evolution de la population et de la malnutrition dans le monde (Source : FAOSTAT).

Nous présentons ici comment l'intensification agricole a permis de répondre à ces défis globaux dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Un parallèle est effectué entre l'évolution du secteur agricole mondial et l'évolution de l'agriculture brésilienne. Enfin, les limites et les alternatives proposées vers un autre mode d'intensification pour le 21^{ème} siècle sont discutées.

2. La « révolution verte »

Jusqu'aux années 1950, l'expansion des terres agricoles représentait le seul moyen d'augmenter la production agricole (Borlaug, 2000a). Depuis 1960, les productions de grains ont pourtant doublé tandis que les surfaces agricoles n'ont augmenté que de 11,5% (FAOSTAT) (fig. 1.15). L'agriculture a donc gagné en efficacité puisqu'elle a accru sa productivité à l'hectare. Ce gain a été rendu possible par deux changements majeurs dans les modes de productions : l'intensification agricole et l'adoption de nouvelles techniques agricoles (Angelsen et Kaimowitz, 2001a). L'intensification agricole² consiste à augmenter le

¹ Norman Borlaug, un des pères de l'intensification agricole, a d'ailleurs reçu le prix Nobel de la paix en 1970.

² Voir aussi les travaux de Canévet (1992) sur l'intensification agricole en Bretagne.

nombre d'intrants par hectare afin d'augmenter la productivité par hectare (par exemple, l'augmentation de l'utilisation de pesticides est un signe d'intensification agricole). Les nouvelles techniques agricoles doivent permettre de maintenir ou d'accroître la production avec une quantité d'intrants équivalente ou moindre (par exemple, les nouvelles variétés de cultures aux rendements supérieurs sont des nouvelles technologies agricoles) (Angelsen et Kaimowitz, 2001a). Ces deux termes sont donc différents puisque (i) l'intensification agricole peut se faire sans adoption de nouvelles technologies et (ii) l'adoption de nouvelles technologies peut ne pas entraîner d'intensification agricole (Angelsen et Kaimowitz, 2001a). Cependant, ces termes sont aussi très proches puisqu'ils visent à une meilleure efficacité économique du système agricole, laquelle est fonction de l'efficacité des technologies agricoles adoptées et des ressources allouées à la production, i.e. le niveau d'intensification (Bravo-Ureta *et al.*, 1993). Ainsi, par commodité, nous nous référerons à l'intensification agricole comme toute action visant à une meilleure efficacité économique par un accroissement des intrants et/ou l'adoption de nouvelles technologies.

2.1. La transition agricole

Selon Bravo-Ureta *et al.* (1993), l'efficacité économique du secteur agricole au début des années 1990 n'était encore que de 43%, ce qui lui permettait de conclure : « *there is considerable room to increase agricultural output in developing countries without increasing input levels and without requiring the use of new technology* ». Ainsi, la « révolution verte » prônée par Borlaug (2000b) n'est pas achevée et est toujours d'actualité pour relever les défis du 21^{ème} siècle. Il convient donc de comprendre les mutations qu'elle a engendrées dans le monde agricole pour atteindre de tels niveaux de production.

La « révolution verte » à la base de l'agriculture moderne actuelle se base sur quatre points fondamentaux : (i) une amélioration de la fertilité des sols, (ii) une lutte plus efficace contre les maladies agricoles, (iii) une plus grande mécanisation et (iv) une meilleure connaissance des cultures et de leur génétique (Matson *et al.*, 1997 ; Tilman, 1999 ; Borlaug, 2000b). La figure 1.15 décrit le phénomène d'intensification agricole qui s'est produit à l'échelle mondiale et brésilienne depuis les années 1960. Elle est à mettre en rapport avec les hausses de production agricole observées en figure 1.13.

La superficie agricole mondiale s'est modérément accrue (+11,5%) entre 1961 et 2005 tandis que de fortes mutations dans les pratiques culturales sont observées. La mécanisation s'est généralisée, avec une hausse du nombre de tracteurs en service de 144%. La fertilité des sols a été améliorée par une utilisation d'engrais azotés (+630%) et phosphatés (+207%) en progression constante. La lutte contre les maladies agricoles s'est renforcée par une forte consommation de pesticides dont les échanges internationaux ont explosé (+5990% pour les importations et +6156% pour les exportations). En outre, les surfaces irriguées ont doublé entre 1960 et 2000 (Tilman, 1999) de telle sorte que 40% de la production mondiale provient aujourd'hui des 16% de terres agricoles qui sont irriguées (Matson *et al.*, 1997 ; Borlaug, 2000a). D'ailleurs, 70% de l'eau utilisée dans le monde l'est à des fins agricoles (Borlaug, 2000a). Enfin, de nouvelles variétés de cultures ont été créées (de manière conventionnelle ou par les biotechnologies). Celles-ci ont permis (i) d'améliorer les rendements (en réduisant la vulnérabilité des cultures aux conditions extérieures et en sélectionnant des variétés de meilleur potentiel) et (ii) d'accroître les superficies arables en adaptant certaines variétés à de nouveaux milieux naturels (le *cerrado* en est le meilleur exemple) (Borlaug, 2000b).

L'adaptation de ces nouvelles méthodes au Brésil s'est également réalisée de manière spectaculaire. Il existe cependant quelques différences. La principale concerne l'accroissement des superficies agricoles qui est beaucoup plus forte à l'échelle du Brésil qu'à l'échelle mondiale (+75% au Brésil contre +11,5% au niveau mondial). Cela indique qu'il existe de fortes variations régionales du mode d'adoption de l'intensification agricole. En fait, les superficies agricoles ont baissé dans les pays développés tandis qu'elles ont largement augmenté dans les pays en voie de développement et surtout dans les pays tropicaux (Lepers *et al.*, 2005). Ces écarts s'expliquent par le fait que l'intensification agricole n'a pas été adoptée au même moment dans tous les pays. De la même manière que les populations connaissent des transitions démographiques en deux phases (une baisse de la mortalité puis une baisse de la natalité), on peut ici parler d'une transition agricole amenée d'abord par une augmentation des surfaces agricoles puis une intensification de la production sur ces surfaces. Or, le Brésil a commencé cette transition plus tardivement que les pays développés. Les graphes (fig. 1.15) montrent ainsi que l'augmentation de la mécanisation et de l'utilisation massive de pesticides et d'engrais au Brésil n'a vraiment débuté qu'au début des années 1970, contre 1950 à l'échelle mondiale. De plus, le Brésil a souffert du manque de variétés adaptées aux régions tropicales pour entamer sa révolution en même temps que les pays développés. Par exemple, le gouvernement brésilien n'a accepté de cultiver et commercialiser des semences génétiquement modifiées qu'à partir de 2005¹, accusant un retard conséquent par rapport à ses concurrents américains et argentins. En conséquence, une grande partie de sa croissance agricole au 20^{ème} siècle a été réalisée par l'extension des surfaces cultivées.

Ce décalage de la transition agricole dans le temps est confirmé par les très fortes augmentations relatives (> 1000%) observées pour les variables de mécanisation, d'utilisation d'engrais et de commerce de pesticides. Ces valeurs sont dues au fait que l'expansion et l'intensification agricole se sont déroulées sur la même période 1960-2005. La transition agricole a donc été particulièrement rapide et intense.

Pour être plus précis, des différences régionales s'observent même à l'échelle brésilienne. Théry et De Mello (2005) remarquent ainsi une baisse des surfaces cultivées dans les régions du sud et une hausse en Amazonie. La transition agricole s'est donc effectuée plus tardivement au Nord qu'au Sud. Cela s'explique par les liens forts existants entre les secteurs agricoles de ces deux régions. C'est parce que l'agriculture capitaliste du Sud a commencé sa transition agricole dans les années 1960-1970 que des producteurs ont dû migrer au nord afin de défricher pour cultiver. On revient donc ici sur la notion de dynamique pionnière présentée au chapitre précédent. La frontière agricole amazonienne est bien la continuité de la frontière agricole du sud du Brésil des années 1940-1950. Le décalage temporel existant dans la transition agricole (i.e. dans le degré d'intensification agricole) entre ces régions s'explique par le fait que ces régions se trouvent à des stades différents de la formation de leur territoire agricole (i. e. à des stades différents du front pionnier).

¹ Lei de Biosegurança 11.105 du 24 mars 2005. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11105.htm

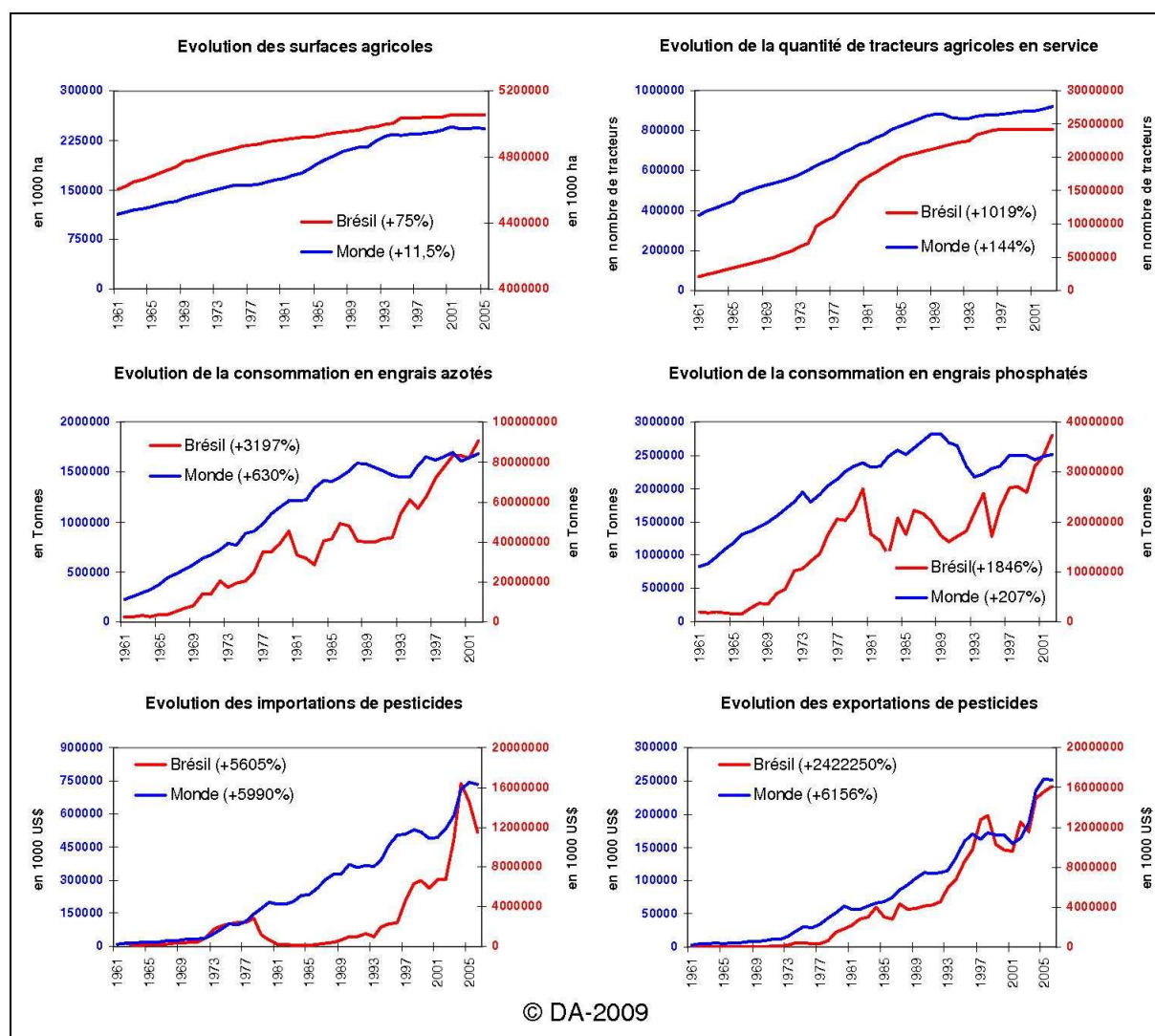


Figure 1.15 : Les facteurs de la révolution verte : une hausse modérée des surfaces agricoles (1) compensée par une forte mécanisation (2), l'application d'engrais (3 et 4) et de pesticides (5 et 6) (Source : FAOSTAT).

2.2. Les limites de la « révolution verte »

La « révolution verte » du 20^{ème} siècle a engendré des changements socio-économiques importants, participant notamment à la réduction de la pauvreté et à l'amélioration de la santé. Mais, de la même manière que la société internationale s'est inquiétée dans les années 1980-1990 de l'impact environnemental de l'avancée du front pionnier dans les forêts tropicales, la « révolution verte » a commencé à être remise en question pour les dégradations qu'elle pouvait engendrer sur le milieu naturel. Deux questions ont notamment été posées : (i) l'intensification agricole est-elle un accélérateur ou un frein pour l'avancée de la déforestation ? et (ii) quel est l'impact de l'adoption des nouvelles pratiques culturales sur l'environnement ?

2.2.1. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation

Borlaug (2000a) estime que, sans la « révolution verte », il aurait été nécessaire d'augmenter les superficies cultivées en céréales de 1,8 milliard d'hectares pour doubler la production agricole tel qu'il a été fait entre 1960 et 2000. Or, les superficies semées en

céréales n'ont augmenté que de 600 millions d'hectares sur cette période. L'intensification agricole a donc permis de limiter les changements d'utilisation du sol voués à l'agriculture et est donc un moyen de réduire la déforestation.

En fait, comme nous l'avons vu, il existe à ce propos de fortes différences entre les pays développés et les pays en voie de développement. Alors que les superficies cultivées décroissent au profit de la forêt dans les pays riches, la déforestation continue de sévir dans les pays en voie de développement (Lepers *et al.*, 2005). L'hypothèse Borlaug, valable à l'échelle globale, pourrait donc ne pas être valable aux échelles locales et régionales.

A une échelle locale, l'hypothèse Borlaug reste valable pour les producteurs pratiquant l'agriculture de subsistance. L'intensification agricole permet de maintenir la production agricole tout en réduisant la superficie cultivée ou en réduisant le travail fourni sur la même superficie. Cependant, cette théorie est mise à mal par les objectifs économiques des producteurs. Un agriculteur cherche généralement à gagner un peu plus pour pouvoir croître économiquement. Il va donc considérer l'intensification agricole comme un moyen d'augmenter la production à l'hectare sur une superficie plus grande en travaillant autant qu'auparavant. On est donc passé d'un rapport « win-win » à l'échelle globale (augmentation de la production et frein à la déforestation) à un rapport « win-lose » à l'échelle locale (augmentation de la production et de la déforestation).

La question est de savoir comment se situe ce rapport à l'échelle régionale, notamment sur un front pionnier. Il n'existe pas de réponse simple à cette question mais simplement des arguments ou des hypothèses tendant à faire pencher le rapport intensification-déforestation vers une situation souhaitée (moins de déforestation) ou vers une situation non souhaitée (plus de déforestation). Ces hypothèses sont présentées par Angelsen et Kaimowitz (2001a).

D'un côté, l'intensification agricole peut être perçue comme un vecteur de déforestation car l'agrégation des décisions des producteurs locaux d'accroître leurs superficies cultivées entraîne forcément de la déforestation à l'échelle régionale. La rentabilité accrue apportée par les nouvelles techniques agricoles incite les producteurs à agrandir leurs exploitations (Angelsen et Kaimowitz, 2001b). De plus, le développement économique apporté par l'augmentation de la production attire de nouveaux migrants sur le front qui cherchent eux-mêmes à se développer économiquement en défrichant de nouvelles terres afin de développer une activité agricole (cf. le cycle de vie d'une exploitation agricole sur le front pionnier au chapitre précédent). Par ailleurs, le développement agricole (et les capitaux accumulés) attire aussi une main d'œuvre agricole bon marché qui rend possible l'adoption de nouvelles pratiques culturales plus demandeuses en hommes. Cette hypothèse est celle défendue par Boserup (1970) pour qui l'augmentation de la population entraîne forcément de la déforestation dans la mesure où, tant que des terres sont disponibles, les producteurs préfèrent toujours agrandir leur exploitation avant d'intensifier leur production. Enfin, le développement économique entraîne une valorisation foncière des terres. Les conflits fonciers se multiplient et le prix à payer pour la conservation de la forêt croît de telle sorte que la création de réserves protégées au sein des fronts pionniers est compliquée.

D'un autre côté, l'intensification agricole peut être perçue comme un frein à la déforestation à l'échelle régionale car le développement économique apporte des changements profonds dans la société qui font baisser la pression sur la forêt. La réduction de la pauvreté entraîne une baisse de la croissance de la population qui réduit donc la déforestation selon l'hypothèse de Boserup (1970). Par ailleurs, le développement

économique implique un développement d'activités non agricoles. Ainsi, (i) des familles de producteurs vont se détourner de l'agriculture et (ii) les populations non agricoles vont développer des revendications environnementales afin de maintenir des services écosystémiques pour la société (qualité de l'eau, de l'air...). De la sorte, la pression sur la forêt se réduit avec le développement économique apporté par l'intensification agricole.

Enfin, si l'intensification agricole dans une région donnée peut être un vecteur ou un frein à la déforestation, il convient aussi d'évaluer son impact sur d'autres régions. Par exemple, le développement économique lié à l'introduction de technologies nouvelles dans une région agricole ancienne peut y entraîner une baisse de la déforestation. Cependant, si le développement ne profite qu'à une partie de la population, un flux migratoire allant de cette région vers une région d'accueil se met en place (Angelsen et Kaimowitz, 2001b). Or les régions d'accueil classiques sont les villes et les fronts pionniers. L'intensification agricole peut donc jouer un rôle indirect de moteur de l'avancée du front pionnier.

Le lien entre intensification et déforestation à l'échelle régionale est donc ambigu. Angelsen et Kaimowitz (2001a) et Angelsen et Kaimowitz (2001b) présentent sept facteurs qui déterminent comment ce lien implique plus ou moins de déforestation :

1. le type de technologie adopté (plus économique en capital ou en travail ; apporte plus ou moins de risques pour la production);
2. les caractéristiques des producteurs (capital disponible, expérience, éducation, aversion au risque);
3. l'accès aux marchés pour les productions (coût de transport);
4. l'état du marché de la main d'œuvre (présence de main d'œuvre qualifiée, salaires moyens);
5. les prix payés aux producteurs pour leur récolte (notamment pour les denrées d'exportations) ;
6. l'accès aux crédits (aide à l'intensification agricole);
7. le régime de propriété (un locataire peut difficilement défricher une terre qui ne lui appartient pas ; en Amazonie, un producteur devient propriétaire en défrichant une terre);
8. les conditions agro-écologiques (relief, sol, climat : les pratiques culturales visant à prévenir l'érosion des sols sont plus importantes en régions tropicales que tempérées par exemple).

Ces facteurs impliquent que les pouvoirs publics jouent un rôle important dans la régulation de ce lien intensification-déforestation. En effet, ce sont eux qui, en définissant les régimes de propriété, l'organisation des marchés, en planifiant les constructions d'infrastructures, en instaurant des lois environnementales... orientent ce lien vers un rapport « win-win » ou « win-lose ». A ce propos, on peut citer l'exemple concret proposé par Line Carpentier *et al.* (2000) qui ont étudié l'impact de l'intensification agricole sur la déforestation à travers des modèles économiques appliqués à des exploitations traditionnelles en Amazonie. Leurs résultats montrent que tant qu'aucune valeur économique n'est donnée à la forêt (par une gestion des forêts durables, par des compensations financières pour les services écosystémiques rendus, par le développement d'activités extractivistes ou de loisirs par exemple), l'intensification agricole joue un rôle accélérateur de la déforestation. Or l'Etat doit aider à mettre en place les filières permettant la valorisation de la forêt.

2.2.2. Des nouvelles pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement

Au cours des années marquées par la montée des idées environnementalistes, l'homme a dû changer son rapport à l'environnement en apprenant à comprendre les interrelations existantes entre son mode de développement et les milieux naturels. Il ne s'agit donc plus de considérer les écosystèmes naturels comme un puits de ressources sans fond sur lesquelles s'appuierait le développement agricole, l'environnement agricole étant ainsi perçu comme un sous-écosystème naturel au service de la société. Il faut au contraire traiter le milieu agricole comme un écosystème à part entière en interaction avec les écosystèmes naturels et la société : on parle alors d'agrosystèmes. Les interactions en jeu impliquent, d'une part, des services et des préjudices que l'agriculture peut obtenir ou subir de la part des écosystèmes et, d'autre part, des services et préjudices que l'agriculture peut fournir ou faire subir aux écosystèmes naturels et à la société (Swinton *et al.*, 2007) (fig. 1.16).

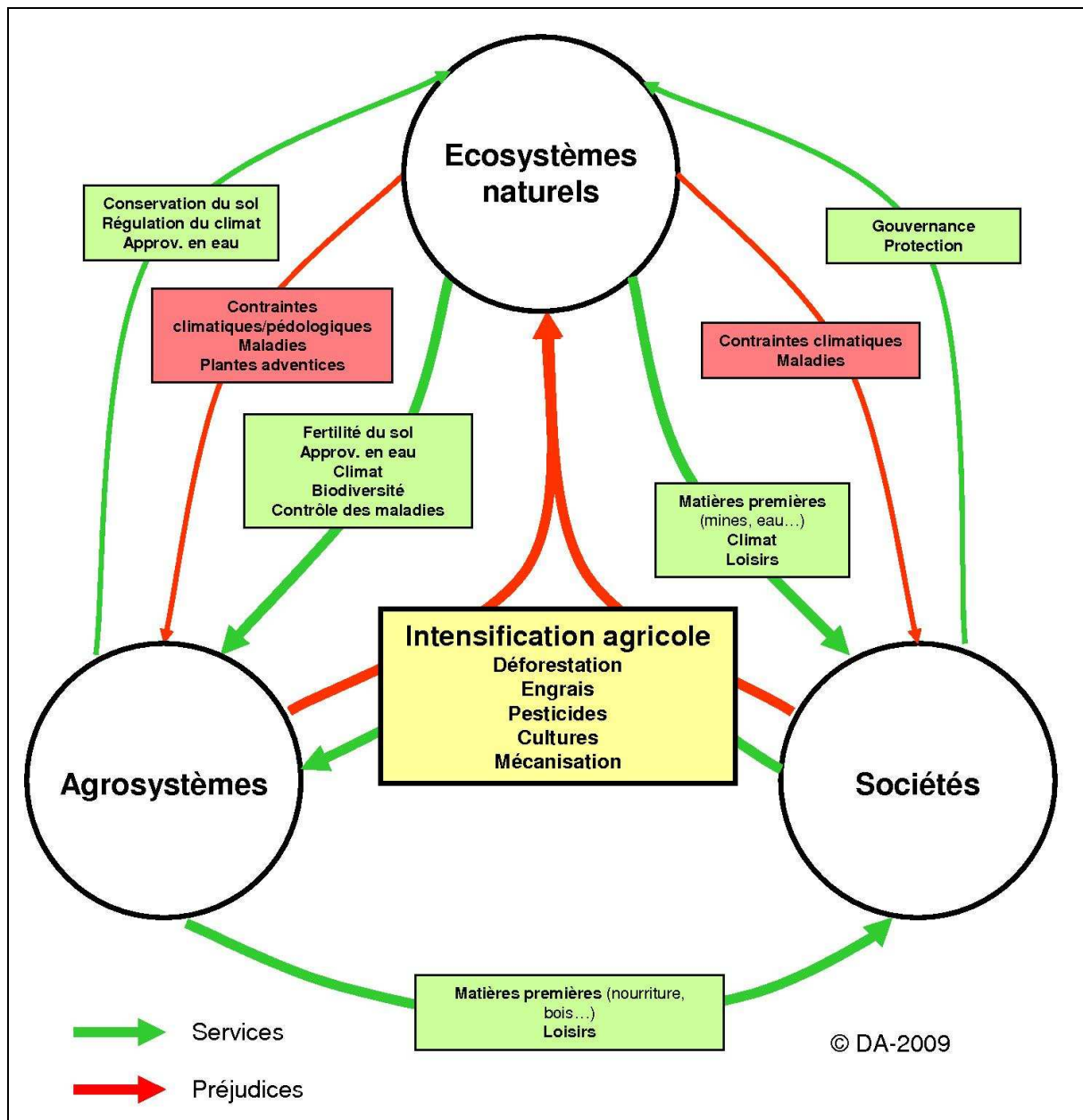


Figure 1.16 : Interrelations entre écosystèmes, agrosystèmes et sociétés dans le cadre de l'intensification agricole.

La première fonction attribuée au secteur agricole est une fonction d'approvisionnement (Zhang *et al.*, 2007). Elle consiste à fournir des matières premières pour la société (nourriture ou bois dans le cas de l'agroforesterie) (Swinton *et al.*, 2007). Avec les services récréatifs (promenades, chasse), cela représente le principal service pour la société provenant des agro-écosystèmes. Par ailleurs, l'agriculture participe à la protection des écosystèmes naturels en aidant à la conservation de la biodiversité (maintien du biote du sol et des pollinisateurs...) et à la séquestration du carbone de l'atmosphère.

En retour, l'agriculture profite de nombreux services écosystémiques de la part du milieu naturel qui sont indispensables à son développement. Zhang *et al.* (2007) distinguent surtout deux catégories de services : le support et la régulation. Le support est apporté par la fertilité des sols liée à sa structure et à sa composition en nutriment. Ces caractéristiques sont notamment influencées par la biodiversité présente dans le sol et qui constitue un autre apport fourni par le milieu naturel. En effet, la biodiversité permet d'améliorer la lutte naturelle contre les maladies par les insectes de telle sorte que 99% des maladies potentielles pour les cultures sont contrôlées par des ennemis naturels (Dale et Polasky, 2007). La biodiversité permet encore la pollinisation nécessaire à la production de 75% des cultures les plus importantes au monde. Elle offre donc les moyens de réguler les rendements. Enfin, l'eau est une ressource vitale pour l'activité agricole et sa disponibilité pour les plantes est régulée par la variabilité climatique et la capacité de rétention des sols.

Dans certains cas, ces mêmes services fournis par les milieux naturels se transforment en facteurs limitant pour le développement de l'agriculture. Les contraintes pédologiques et climatiques déterminent les régions potentiellement cultivables (Zhang *et al.*, 2007). La présence de plantes adventices ou de microorganismes et d'insectes entraîne des maladies affectant les cultures et les rendements. Notamment, les plantes adventices profitent des mêmes conditions que les cultures pour se développer et rentrent donc en compétition avec les cultures pour profiter des ressources en eau et en nutriments (Zhang *et al.*, 2007).

L'intensification agricole instaurée par les sociétés humaines a pour objectif principal de réduire la vulnérabilité de l'agriculture à ces facteurs limitants. Une solution proposée est d'appliquer plus de pesticides et d'engrais. Ceci a permis d'augmenter considérablement les productions à moyen terme (par exemple, les producteurs américains ont multiplié leurs rendements de maïs par 4 entre 1940 et 2000). Cependant, sur le long terme, l'augmentation de l'utilisation d'engrais dans le sol nourrit les cultures mais aussi les plantes adventices qui prolifèrent. Ainsi, dans certains cas, « *the negative impacts of such devastating pests on crop yields can outweigh any positive effect of additional N on crop production* » (Zhang *et al.*, 2007).

Mais ce sont surtout les impacts environnementaux engendrés par ces pratiques agricoles qui risquent de porter préjudice aux productions agricoles sur le long terme (Borlaug, 2000a). L'utilisation d'engrais azotés (N) et phosphatés (P) a été multipliée par 7 et 3,5 entre 1960 et 1995 (Tilman *et al.*, 2002) mais une partie seulement de ces engrais est captée par les plantes pour améliorer la productivité : 30 à 50% pour N et 45% pour P (Tilman *et al.*, 2002)¹. L'autre partie s'échappe sous forme de traces gazeuses vers l'atmosphère ou rejoint les cours d'eau par lessivage des sols (Matson *et al.*, 1997), or environ 17% des terres ont subies une dégradation des sols depuis 1945 (Tilman *et al.*, 2002). Les pertes chimiques d'engrais et de

¹ A ce titre, les travaux réalisés en Bretagne par le CAREN (Centre Armoricaire de Recherches en Environnement) sont révélateurs de l'impact de l'intensification agricole liée à la « révolution verte » sur les écosystèmes : <http://www.caren.univ-rennes1.fr/>

pesticides liées à ces dégradations affectent l'environnement (pollution des sols, des eaux et de l'atmosphère) selon les climats et les types de sol et mettent en danger la santé humaine (Matson *et al.*, 1997).

Par ailleurs, l'intensification agricole s'est appuyée sur les efforts de recherche menés pour sélectionner les meilleures variétés à cultiver. De cette manière, l'agriculture moderne s'est orientée vers des formes de monoculture. Or, la diversité des cultures est un élément déterminant de la biodiversité totale. Elle influence la composition et l'abondance de la biote du sol et des maladies, qui en retour affectent la croissance des plantes (Matson *et al.*, 1997).

Il apparaît donc que le développement agricole est conditionné par les services (fertilité des sols, climat, biodiversité, régulation des maladies...) et préjudices (maladies, événements climatiques...) que les écosystèmes naturels peuvent lui apporter ou lui faire subir. La « révolution verte » a cherché à optimiser l'utilisation des services écosystémiques tout en limitant la dépendance agricole aux préjudices écosystémiques afin d'améliorer la production à court et moyen terme. Cependant, ces méthodes commencent à atteindre leurs limites de production (Conway et Toenniessen, 1999) et leurs impacts sur l'environnement sont préoccupants. Si ces méthodes intensives étaient conservées pour doubler la production en 2050, les quantités d'engrais utilisés devraient tripler (Tilman *et al.*, 2002). Ces méthodes ne sont donc pas viables à long terme. Il faut à présent poursuivre les efforts de recherche privé-public en prenant soin que le développement agricole ne nuise pas au maintien des services écosystémiques à long terme (Tilman, 1999 ; Conway et Toenniessen, 1999).

3. L'agriculture au 21^{ème} siècle, vers une intensification écologique

L'agriculture du 21^{ème} siècle doit devenir plus durable, c'est-à-dire qu'elle doit atteindre les objectifs de production sans réduire ou dégrader les ressources naturelles pour l'avenir (Matson *et al.*, 1997). Pour cela, il est nécessaire (i) d'améliorer l'efficacité des fertilisants, (ii) d'améliorer l'utilisation de l'eau, (iii) de maintenir et de restaurer la fertilité des sols et (iv) de mieux contrôler les maladies et invasions (Tilman *et al.*, 2002).

Ces quatre points peuvent être accomplis en combinant différentes méthodes : (i) amélioration des variétés agricoles, (ii) adoption de nouvelles pratiques culturales, (ii) adoption de nouvelles technologies et (iii) meilleure considération du rôle des paysages agricoles.

Les biotechnologies offrent de nombreuses perspectives pour l'amélioration des variétés de cultures (Borlaug, 2000a). L'amélioration génétique pourrait permettre de rendre plus efficace l'absorption des engrais par les plantes, limitant ainsi les rejets de nitrates vers les cours d'eau. De même, la biotechnologie doit permettre de créer des variétés plus résistantes à la sécheresse, réduisant la vulnérabilité des cultures aux aléas climatiques. Enfin, des cultures transgéniques résistantes à certaines maladies doivent autoriser une réduction de l'emploi de pesticides. Cependant, les biotechnologies font débat car leurs impacts socio-environnementaux sont encore mal maîtrisés. Persley et Siedow (1999) distinguent : « *technology-inherent risks and technology-transcending risks. The former include assessing any risks associated with food safety and the behavior of a biotechnology-based product in the environment. The latter emanate from the political and social context in which the*

technology is used and how these uses may benefit and/or harm the interests of different groups in society”.

Parmi les *technology-inherent risks*, on remarque donc notamment les risques pour l’environnement (par exemple, la tendance à l’homogénéité génétique et la capacité de dissémination de gènes dans les écosystèmes naturels peuvent affecter la biodiversité ; Persley et Sidow, 1999 ; Johnson, 1999 ; Swaminathan, 1999) et les risques pour la santé humaine (par exemple, le développement du risque allergique et de la résistance à certains antibiotiques ; Persley et Siedow, 1999). Parmi les *technology-transcending risks*, on distingue notamment le problème de la propriété intellectuelle (Persley et Siedow, 1999). La recherche sur les organismes transgéniques étant principalement effectuée par des organismes privés, les OGM pourraient devenir un facteur de ségrégation entre les producteurs riches, pouvant se fournir en semences OGM, et les plus démunis (Swaminathan, 1999). Pour ces raisons, Borlaug (2000a) précise que les technologies conventionnelles doivent continuer d’être appliquées conjointement avec les biotechnologies. Finalement, Uzogara (2000) résume les risques et bénéfices potentiels liés au développement des cultures OGM (tableau 1.3).

Risques et enjeux	Bénéfices potentiels
Altération de la qualité nutritionnelle des aliments	Augmentation de la production (par amélioration des rendements et expansion des terres arables)
Résistance aux antibiotiques	Augmentation de la durée de conservation
Toxicité potentielle des OGM	Amélioration de la qualité nutritionnelle des aliments
Potentiel allergénique des OGM	Amélioration de l’apport en protéine des aliments
Transfert de gènes vers des plantes sauvages	Création de vaccins
Création potentielle de nouveaux virus	Défenses biologiques contre les maladies, le stress hydrique, les herbicides...
Accès limité aux semences à cause des brevets sur le OGM	Protection de l’environnement
Menace pour la diversité génétique des cultures	Source de matière première pour l’industrie
Enjeux culturels, religieux et éthiques	Création d’emploi/richesse
Enjeux sur la traçabilité et la labellisation des aliments OGM	
Enjeux pour les producteurs aux méthodes traditionnelles et biologiques	
Menace de l’inconnu	

Tableau 1.3 : Risques et bénéfices potentiels liés au développement des biotechnologies en agriculture (d’après Uzogara, 2000).

Conjointement, de nombreuses pratiques culturales doivent être adoptées. L'utilisation d'engrais organiques permet par exemple de limiter l'emploi d'engrais chimiques. Laisser une couverture des sols en permanence sur les sols et appliquer un semis direct (semis effectué sur les résidus végétaux des cultures précédentes, sans travail de la terre au préalable) protège mieux les sols en limitant la perte d'engrais par érosion, améliore la qualité des sols en apportant de la matière organique et conserve plus longtemps l'eau dans les sols (Borlaug, 2000b ; Scopel *et al.*, 2005 ; Martorano *et al.*, 2009). Les semis-directs ont notamment fait leur preuve au Brésil (en particulier dans les *cerrados*) où 16 millions d'hectares étaient déjà cultivés de la sorte en 2005 (Scopel *et al.*, 2005). Laisser une couverture végétale permet aussi de mieux contrôler les maladies, ce qui permet de réduire l'emploi de pesticides. Par ailleurs, cette méthode facilite l'application de systèmes de successions et de rotations culturales. La diversification des cultures est un bon moyen d'optimiser l'utilisation des engrais tout en contrôlant mieux les maladies (Tilman *et al.*, 2002). Toutefois, le même auteur précise que « les systèmes avec deux ou trois cultures par an peuvent devenir progressivement sensibles aux maladies et aux invasions d'insectes à cause de l'insuffisance de diversité dans les rotations culturales ».

Les nouvelles technologies portent également de nombreux espoirs pour l'amélioration des rendements. D'une part, des machines agricoles plus performantes sont nécessaires pour réduire les pertes en période de récolte. D'autre part, l'agriculture de précision qui consiste à appliquer des fertilisants ou des pesticides en fonction des besoins des cultures dans le temps et dans l'espace doit augmenter l'efficacité d'utilisation des intrants. Sur le même principe, l'irrigation peut être optimisée avec des pivots plus efficaces. Appliquer une « agriculture de précision » nécessite de pouvoir réaliser un suivi efficient des cultures. Les techniques de télédétection doivent notamment se développer pour apporter une avancée majeure dans ce domaine (Cassman, 1999 ; Pinter *et al.*, 2003).

Enfin, la prise en considération des paysages agricoles est un élément important de la nouvelle orientation que doit suivre le monde agricole. Le point critique concerne la préservation forestière des berges de cours d'eau (Tilman *et al.*, 2002). Celles-ci offrent en effet de nombreux services écosystémiques pour les cultures. Elles servent tout d'abord d'habitats pour les organismes qui vont permettre la pollinisation des cultures et un meilleur contrôle des maladies. Ensuite, les forêts permettent de limiter l'érosion des sols et de purifier l'eau des composants chimiques apportés par les engrais et les pesticides avant qu'elle ne rejoigne les cours d'eau.

Toutes les améliorations proposées doivent s'orienter vers une production plus performante, plus rentable et surtout plus respectueuse de l'environnement. L'intensification agricole débutée au 20^{ème} siècle par la « révolution verte » doit donc évoluer aujourd'hui vers ce qui est dénommé : l'intensification écologique (Cassman, 1999) ou l'agriculture de conservation¹. Borlaug (2000a) parle aussi de « révolution bleue » car les nouvelles pratiques culturales doivent mieux protéger les ressources en eau.

4. Conclusion

Le monde agricole doit relever un défi de taille au 21^{ème} siècle : doubler sa production sans dégrader l'environnement. La solution réside dans une utilisation raisonnée et combinée des améliorations de pratiques culturales évoquées au cours de ce chapitre. Alors que de gros

¹ <http://www.fao.org/ag/ca/fr/>

efforts ont été effectués par la recherche pour déterminer les modes d'intensification agricole optimaux, la question se pose aujourd'hui de savoir (i) comment convaincre les producteurs d'adopter les nouvelles pratiques et (ii) comment réaliser un suivi de l'adoption de ces pratiques.

Inciter les producteurs à adopter des mesures agricoles nouvelles est une tâche difficile, mais c'est un enjeu crucial pour le développement d'une agriculture durable (Tilman *et al.*, 2002). Toute la difficulté réside dans les différences d'échelle impliquées. Il faut convaincre les producteurs d'adopter localement des pratiques (semis direct, choix des variétés semées, agriculture de précision, conservation des paysages agricoles...) dont les bénéfices environnementaux sont perçus aux échelles régionales et globales, tandis qu'elles peuvent engendrer des préjudices au producteur à court terme. Par exemple, réduire les quantités d'engrais et de pesticides appliquées dans les champs aide à la préservation des eaux et des sols mais peut impliquer des pertes de rendements pour les producteurs (Tilman *et al.*, 2002). En outre, l'adoption de pratiques à une échelle locale peut s'avérer inefficace si les producteurs voisins n'appliquent pas ces mêmes pratiques. Par exemple, la protection des berges de cours d'eau pour limiter l'érosion et réguler la qualité des eaux n'a d'intérêt qu'à l'échelle régionale ou à l'échelle du bassin versant (Zhang *et al.*, 2007).

Il est donc primordial de trouver des moyens d'inciter les producteurs à adopter les pratiques culturelles proposées. Selon Bravo-Ureta *et al.* (2003), l'adoption de pratiques par les producteurs dépend :

- de l'éducation : il est important de sensibiliser les producteurs aux problèmes environnementaux ;
- de l'expérience et des contacts entre producteurs : les producteurs ont tous des expériences différentes, notamment en fonction de leurs origines et de leurs trajectoires socio-économiques. Le fait d'augmenter les contacts entre producteurs permet de diffuser les meilleures pratiques culturelles appliquées dans les communautés agricoles ;
- de la taille des exploitations : un grand producteur est plus enclin à adopter des pratiques culturelles dont les bénéfices environnementaux se font ressentir à une échelle régionale ;
- du capital du producteur et de l'accès aux crédits : un producteur adopte les nouvelles pratiques culturelles si il est incité financièrement à le faire.

Ce dernier point est primordial et soulève certaines questions déjà évoquées au premier chapitre concernant la difficulté d'organiser la protection des forêts tropicales :

- Qui doit payer pour inciter les producteurs à adopter les nouvelles pratiques culturelles ?
- Le producteur est chargé de maintenir les services écosystémiques dans son exploitation et doit donc financer lui-même l'adoption des pratiques qui à long terme vont lui permettre d'améliorer sa productivité ?
- L'Etat doit-il accorder des subventions aux producteurs pour les inciter à modifier leurs modes de production ?
- Les pays importateurs, et donc les consommateurs, doivent financer les producteurs qui adoptent les bonnes pratiques en acceptant d'acheter plus cher des biens produits de manière plus respectueuse de l'environnement. De la sorte, la globalisation des marchés agricoles, notamment celui du soja, pourrait devenir un vecteur de conservation de l'environnement après avoir été un facteur de déforestation (Nepstad *et al.*, 2006a). Cette situation pose alors deux questions : (i) le problème de la

traçabilité des produits qui doivent être différenciés selon le mode de production et (ii) la nécessité d'accorder les demandes des consommateurs avec les enjeux de l'intensification agricole. Par exemple, Borlaug (2000b) et Hoban (1998) signalent la réticence des nations européennes à accepter les biotechnologies qui, selon eux, sont un vecteur primordial de l'intensification agricole.

- le montant des crédits accordés doit être fonction des services écosystémiques apportés par l'agriculture. La question qui se pose donc est : comment mesurer la valeur des services écosystémiques fournis?

Par ailleurs, la mise en place de telles incitations nécessite un suivi des améliorations des services écosystémiques apportés par l'adoption des pratiques culturales. Or, ces services sont difficiles à mesurer directement (ex : apport pour la régulation du climat, de la biodiversité...). Dale et Polasky (2007) proposent donc de rechercher des indicateurs ou des combinaisons d'indicateurs permettant d'évaluer le degré d'adoption de ces pratiques culturales. Ces indicateurs doivent pouvoir mesurer les changements associés aux pratiques agricoles : les changements d'occupation du sol, l'érosion, l'évolution de l'utilisation des produits chimiques et des ressources en eau (Dale et Polasky, 2007). Ces auteurs précisent que les changements d'occupation du sol incluent à la fois des conversions d'occupation du sol (déforestation à des fins agricoles) et des modifications dans les types d'agriculture pratiquées (Dale et Polasky, 2007). La télédétection offre notamment des perspectives prometteuses pour ce type de suivi (cf. Partie 2).

De plus, l'intensification agricole pourrait être une réponse aux défis énergétiques de ce siècle. En effet, les agrocarburants sont amenés à se développer. C'est notamment vrai au Brésil où on pense planter 17 millions d'hectares de canne à sucre pour remplacer 5% de la consommation d'essence en 2025 (Cerqueira Leite *et al.*, 2009). Ces cultures pourraient alors rentrer en compétition avec des cultures destinées à l'alimentation (notamment dans le *cerrado* brésilien largement semé en soja), ce qui forcerait à décupler l'effort d'intensification agricole pour atteindre les objectifs annoncés.

Pour conclure, l'intensification agricole est un enjeu global majeur du 21^{ème} siècle pour nourrir une population de 10 milliards de personnes prévues en 2050. Cependant, son application passe par la mise en place d'actions aux échelles régionales et locales. Le Mato Grosso, en tant que plus grande région agricole du Brésil, joue un rôle leader dans la transition agricole que connaît actuellement le Brésil. A ce titre, les territoires du soja montrent la voie à suivre.

Chapitre 4. Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso : l'exemple de Sorriso

1. Introduction

L'Etat du Mato Grosso illustre l'émergence de nouveaux territoires intégrés à l'économie nationale et internationale à travers l'expansion d'un front pionnier. L'occupation de l'espace s'est dans un premier temps effectuée le long des routes ouvertes par les militaires au début des années 1970. Les modes de colonisation privée, mixte (public/privée) et publique ont entraîné une forte différenciation interne avec l'émergence d'un groupe social fort autour des agriculteurs fortement capitalisés. Ceux-ci se sont affirmés durant la phase de consolidation où un nouvel essor économique a été rendu possible par l'expansion de cultures d'exportation comme le soja. Des régions entières ont été mises en valeur, les plateaux du centre du Mato Grosso offrant à la fois les conditions physiques et foncières favorables à l'expansion de la monoculture du soja importée par les colons du Sud du Brésil. Touchés par une crise économique depuis 3 à 4 ans, les « *sojiculteurs* » cherchent aujourd'hui à s'adapter au nouveau contexte économique et environnemental. Le dynamisme qui a permis à ces producteurs de coloniser les *cerrados* et les forêts amazoniennes du Mato Grosso est aujourd'hui dédié à la recherche de nouveaux créneaux économiquement porteurs. Ce faisant, de nouveaux territoires toujours plus intégrés aux économies nationales et internationales se forment.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les différentes phases du développement des territoires du soja au Mato Grosso. Il s'agit d'abord de présenter le mode de colonisation agricole des années 1980-2000 et de comprendre les raisons qui ont engendré la crise des années 2004-2007. Enfin, il faut chercher dans les évolutions plus récentes de ces territoires et de leurs acteurs les éventuels signes d'une adaptation. La commune de Sorriso (première commune productrice de soja du Brésil) est à cet égard particulièrement démonstrative et servira d'exemple à cette étude (fig. 1.17).

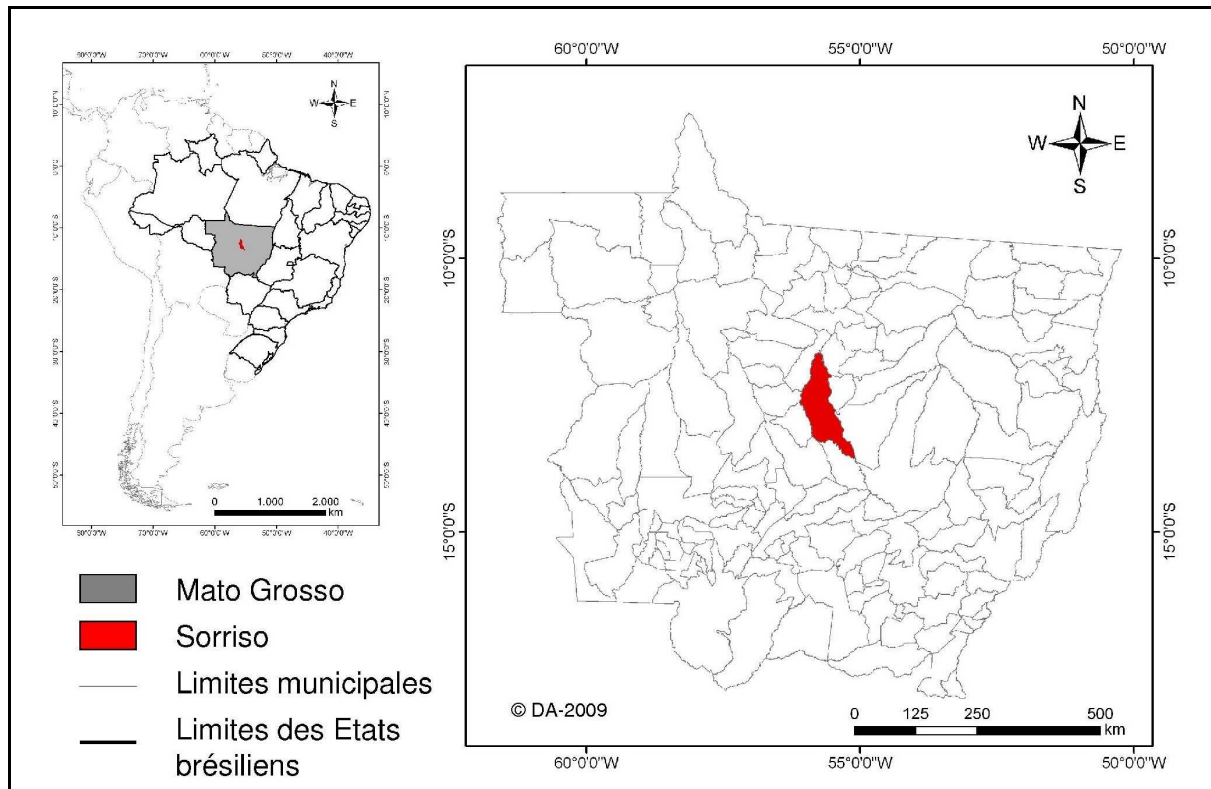


Figure 1.17 : Localisation du Mato Grosso (à gauche) et de la commune de Sorriso (à droite).

2. Développement économique et émergence de nouveaux territoires

2.1. Le Mato Grosso, nouveau grenier du Brésil

Depuis maintenant 20 ans, le Mato Grosso s'est imposé comme un grenier de la planète. Cela s'explique par une formidable croissance des surfaces cultivées liée à des programmes gouvernementaux de colonisation et de modernisation de l'agriculture qui avaient pour but d'affirmer la place du Brésil sur les marchés agricoles mondiaux (cf. encadré sur le marché du soja dans le monde). La figure 1.18 montre l'importance prise par différentes cultures au Mato Grosso, et notamment par la culture du soja. Les productions de cette denrée sont passées de 3 millions de tonnes en 1990 à 17,7 millions de tonnes en 2005 (année de production maximale), soit une augmentation de 600% qui s'explique bien sûr par une forte augmentation des surfaces cultivées en soja (+227%) mais également par des rendements en hausse constante (+53%). Cette hausse a été favorisée par les efforts réalisés par la recherche brésilienne qui a notamment su adapter la culture du soja dans les *cerrados* (Bertrand, 2004). En fait, toutes les principales cultures présentes dans cet Etat ont fortement progressé : les surfaces cultivées ont été multipliées par 2,3 pour la canne à sucre, par 5 pour le maïs, par 11,9 pour le coton et traduisent bien le dynamisme de l'agriculture mécanisée dans la région, qui cherche toujours à être la plus performante et la plus rentable possible. Seule la culture du riz a régressé (-28% de surface cultivée), en montrant tout de même de fortes variations. De plus, les rendements se sont accrus de moitié pour le soja, le maïs et la canne à sucre et ont même doublé pour le coton et le riz.

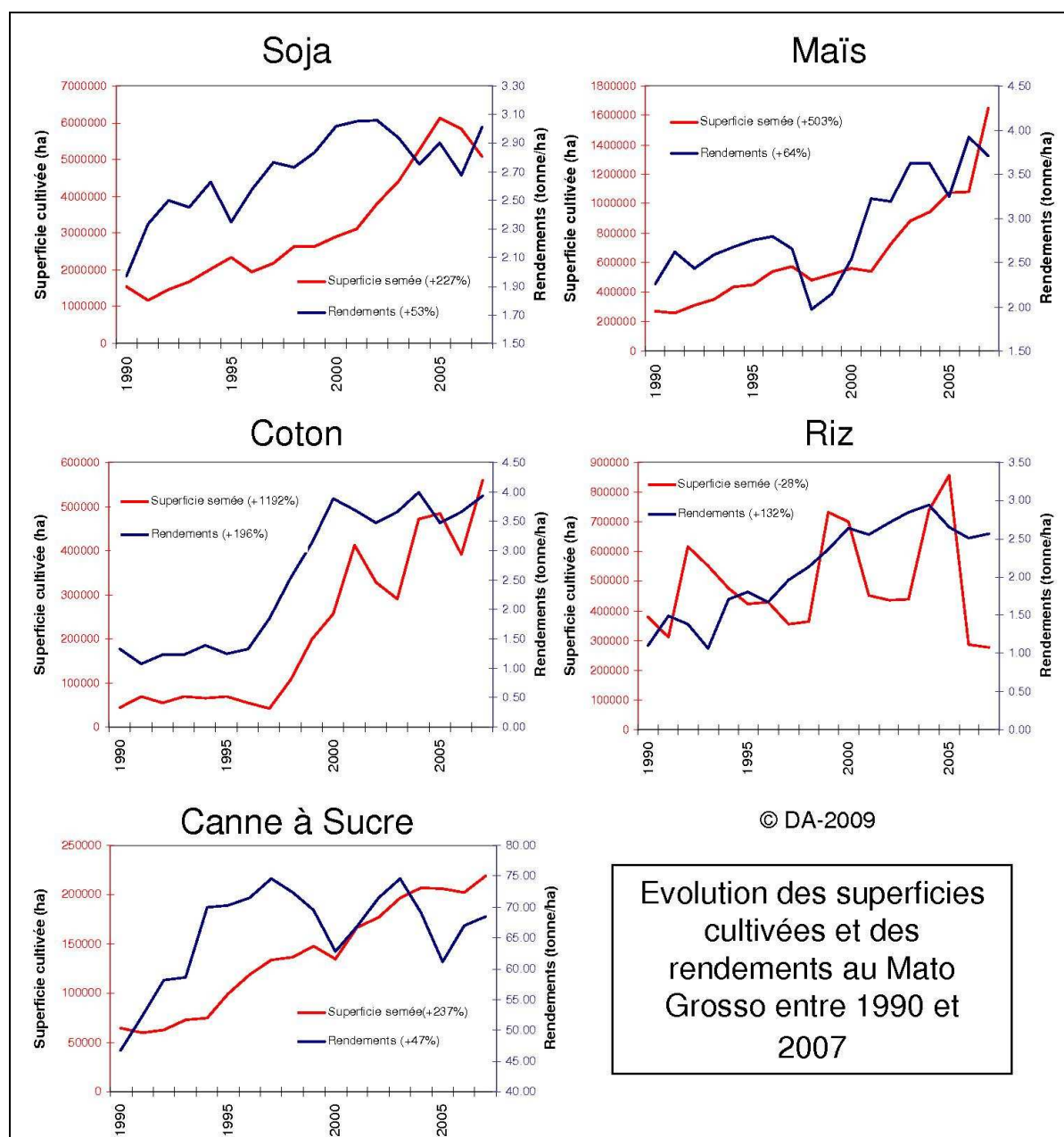


Figure 1.18 : Evolution des surfaces cultivées des principales cultures au Mato Grosso (Source : IBGE, 2008).

La « révolution verte » a donc joué un rôle moteur dans le développement de cette région tropicale et a instauré une certaine spécialisation régionale. La culture du soja (plus de 5 millions d'hectares en 2007) est le pilier de l'économie mato-grossense et est cultivée dans toutes les régions d'agriculture capitaliste de l'Etat. On la distingue surtout dans les régions planes du « Centre-Nord », le long de la route fédérale BR-163 (autour de Sorriso, première commune productrice de soja au Brésil), et sur les plateaux de la Chapada dos Parecis à l'Est (fig. 1.20). On remarque également des centres de production moins importants au sud-est (autour des communes de Primavera do Leste, Campo Verde et Rondonópolis) et à l'est (notamment à Querência où le groupe Andre Maggi a acquis une fazenda de 72600 ha en 2004¹). Dans ces régions d'open-field, l'agriculture est fortement mécanisée (fig. 1.21)

¹ <http://www.grupomaggi.com.br/pt-br/materia.jsp?areaId=45&id=65>

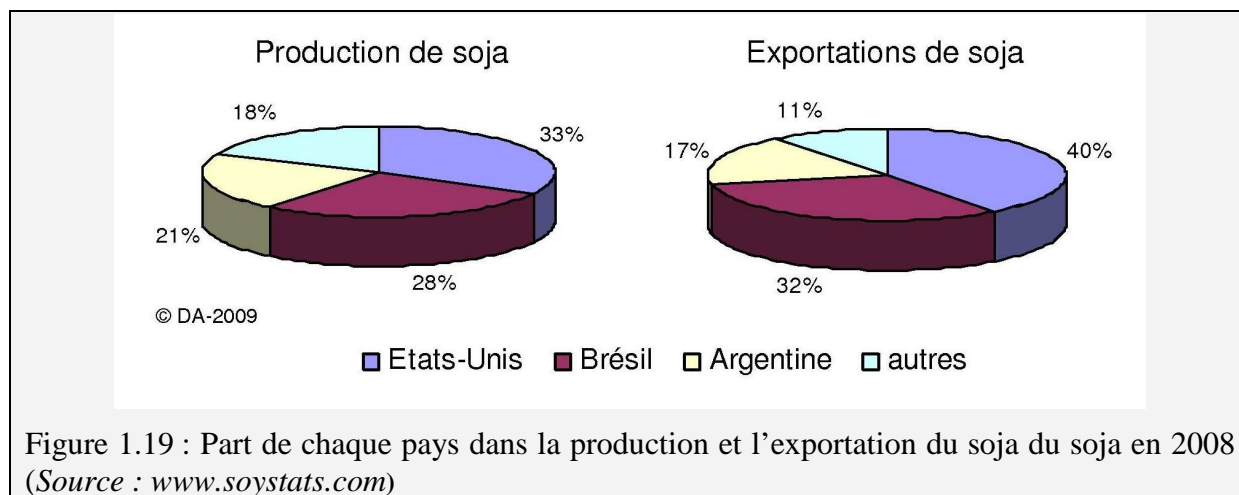
La culture du soja dans le monde

Le soja est originaire de Chine où il est consommé sous forme de graines depuis plus de 3000 ans. Ce n'est qu'au milieu du 19^{ème} siècle que les premières graines de soja furent ramenées dans les pays occidentaux. Son exploitation commerciale débuta aux Etats-Unis dans les années 1920. Depuis, la culture du soja a connu une forte expansion qui s'est accrue exponentiellement à partir des années 1960 avec la commercialisation de nouveaux produits dérivés du soja (Embrapa, 2004). Le soja est commercialisé sous trois formes : les graines de soja, les tourteaux de soja et l'huile de soja. Les graines de soja font partie intégrante de la culture alimentaire des sociétés asiatiques et deviennent populaires aujourd'hui dans le monde entier. Les tourteaux et l'huile de soja sont issus d'une opération de transformation appelée la trituration. Aujourd'hui, plus de 95% des graines du marché sont triturées (Pereira, 2004). La trituration vise à extraire l'huile du soja tandis que les tourteaux sont composés du résidu de cette opération. En moyenne, une tonne de graines donne 790 kilos de tourteaux, 180 kilos d'huile brute et 30 kg de résidus (Carfantan, 1991). Les tourteaux de soja sont destinés à l'alimentation animale car ils permettent de satisfaire les besoins en protéines des porcs, des volailles et des bovins.

Le développement du marché du soja est dû à des téléconnections d'échelle globale (Nepstad *et al.*, 2006a). Par exemple, la demande en tourteaux de soja s'est accrue après l'apparition en 1998 de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB) (la maladie de la « vache folle ») en Europe qui a mené à l'interdiction des farines animales. Les farines végétales ont alors été favorisées : 68% des farines végétales (et 30% des huiles végétales) sont aujourd'hui issues du soja. A l'inverse, l'apparition de la grippe aviaire a fait baisser la consommation de volaille et a ainsi fait chuter les cours du soja à partir de 2004 (Nepstad *et al.*, 2006a). On peut donc aujourd'hui se demander si la grippe porcine apparue en 2009 peut également affecter les cours du soja.

L'Asie, l'Europe et les Etats-Unis sont aujourd'hui les plus gros consommateurs de tourteaux de soja. L'intérêt de l'Europe pour le soja réside surtout dans les tourteaux de soja. L'Europe possède d'ailleurs d'importants moyens de trituration, notamment aux Pays-Bas, qui lui permettent d'importer des graines moins coûteuses que les tourteaux. En Asie, la croissance de la demande s'explique par l'augmentation de la population qui est traditionnellement consommatrice d'huile de soja et de plus en plus consommatrice de viande, nécessitant l'importation de tourteaux de soja. L'Iran, l'Inde et surtout la Chine sont parmi les premiers importateurs d'huile de soja brésilienne.

Si le soja est consommé dans le monde entier, la production se concentre quant à elle dans trois pays : les Etats-Unis, le Brésil et l'Argentine. Le marché du soja est donc dans une situation oligopolistique (figure 1.19). Au Brésil, l'Etat du Mato Grosso est le principal producteur de soja, avec 15,275 millions de tonnes en 2007, soit 26% de la production nationale.



Le riz est cultivé directement après les défrichements pendant un ou deux ans afin de corriger les sols avant le semis du soja (Dubreuil *et al.*, 2005). La variabilité des superficies cultivées en riz est donc liée à la variabilité de la déforestation au Mato Grosso. En conséquence, on trouve cette culture surtout dans les communes récemment ouvertes, en marge de la BR-163, ainsi qu'à Sinop où le riz s'est imposé comme une culture plus « traditionnelle » (Mendez del Villar et Ferreira, 2005). Le maïs, étant semé en deuxième récolte après le soja, s'est logiquement développé dans les mêmes communes que le soja. C'est également le cas du coton qui est cultivé aussi bien en culture principale qu'en deuxième récolte après le soja. La différence toutefois est que le coton s'est imposé dans des régions (Chapada dos Parecis et Primavera do Leste) où les fazendas sont de tailles supérieures, car issues de colonisation un peu plus récente et moins organisée que le long de la BR-163, et ayant donc plus de moyens pour investir dans cette activité (Dubreuil *et al.*, 2005). La localisation de cette culture dépend par ailleurs aussi de la proximité des usines d'égrenages, notamment bien représentées au sud-est de l'Etat, près de Rondonópolis et Primavera do Leste. De son côté, la canne à sucre s'est surtout développée dans la Chapada dos Parecis grâce à la présence d'usines de transformation dans la région. L'élevage bovin enfin a également connu une forte croissance au cours de ces dernières années, mais cette production s'est surtout imposée dans la région nord à cause du relief plus accidenté et du climat plus humide qui interdit l'expansion de l'agriculture mécanisée.

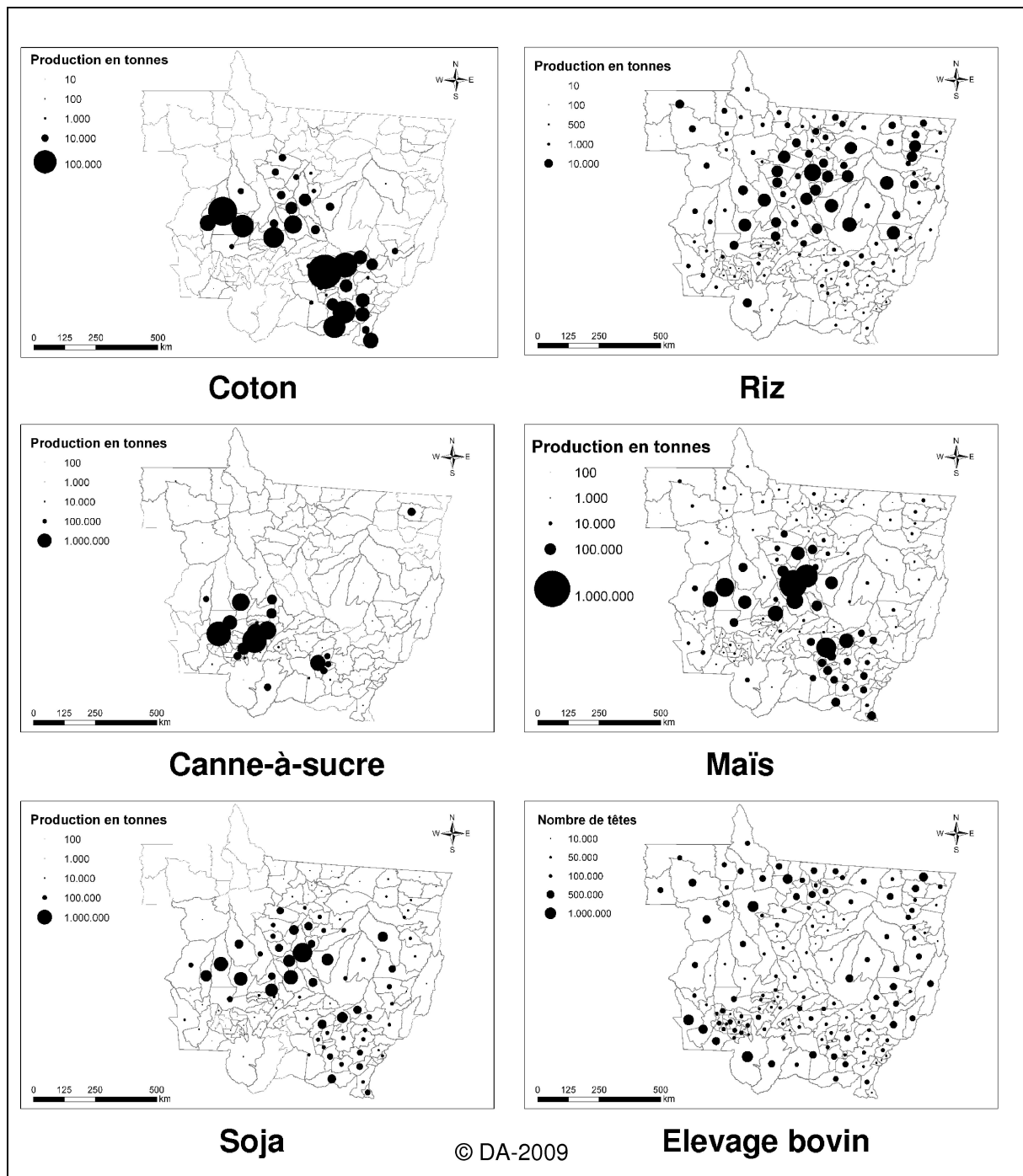


Figure 1.20 : Productions agricoles par commune au Mato Grosso en 2005. (Source : IBGE, 2008)



Figure 1.21 : Paysages agricoles à Campo Novo do Parecis (Source : Prefeitura de Campo Novo do Parecis)

2.2. La formation des territoires du soja au Mato Grosso

L'intensification agricole des années 1990-2000 a débouché sur une certaine homogénéisation des systèmes agricoles axés sur une ou deux cultures largement prédominantes, le soja étant la culture commune à tous ces systèmes (exceptés ceux de la canne à sucre et de l'élevage bovin). Une présentation historique de la colonisation au Mato Grosso permet de comprendre comment cette quasi-monoculture s'est installée au point de devenir un pilier de l'économie régionale.

A l'origine, la culture du soja au Mato Grosso s'est surtout développée par l'intermédiaire des projets de colonisation privée entre 1970 et 1990. 33 entreprises privées avaient acheté des *terras devolutas* à bas prix à l'Etat du Mato Grosso ou au gouvernement fédéral et ont ainsi implanté pas moins de 88 projets de colonisation (Siqueira, 2002). Les personnes concernées par ces projets étaient surtout des producteurs originaires du Sud souhaitant agrandir leurs exploitations et ayant déjà une culture de la terre (Jepson, 2006). Ce dernier point a permis d'affirmer le succès de ce type de colonisation par rapport à la colonisation publique dont les colons n'avaient bien souvent pas les compétences pour développer une activité agricole en Amazonie.

L'histoire de la commune de Sorriso est un exemple-type du mode de colonisation agricole au Mato Grosso et de l'évolution qui s'en est suivie. Située dans le centre de l'Etat, le long de la route BR-163 reliant Cuiaba à Santarem, cette commune a connu un essor rapide depuis 1975 avec une forte immigration de colons venus du Sud du pays. Elle a évolué au rythme soutenu des cycles d'expansion du front pionnier. La première phase d'occupation du

territoire date du début des années 70. Elle correspond à une colonisation privée individuelle dans le cadre de grandes fazendas (faz. Progresso) dépassant les 10 000 ha et plutôt tournées vers l'élevage. A partir de 1975, l'occupation privée se poursuit sur les terres non encore occupées et est menée par l'entreprise de colonisation Colonizadora Feliz LTDA. Cela se traduit par l'arrivée de producteurs venant notamment des Etats du Parana, de Santa Catarina, de Rio Grande Do Sul. Ces migrants apportent leurs connaissances de la terre acquises dans leur région d'origine et pratiquent alors une agriculture centrée les premières années sur la production du riz. Par dérision, le nom de Sorriso rappelle l'importance de cette dernière culture pratiquée ici par beaucoup de colons d'origine italienne : « *So rizzo* », seulement du riz !

L'introduction du soja, consécutivement à l'épuisement des sols, et la grande vague migratoire des années 80 marquent l'évolution du front pionnier. Celui-ci passe en effet à un stade d'intégration caractérisé par un changement radical dans l'économie locale lié au développement de l'agriculture. La région de Sorriso, comme d'autres régions de *cerrado*, s'intègre au marché des intrants agricoles sous l'impulsion de programmes gouvernementaux de modernisation de l'agriculture dans le contexte d'un marché externe en forte demande de tourteaux de soja (Programmes Proterra, Polocentro). Elle est ainsi conçue comme un pôle de développement bénéficiant de l'aide du CPAC (Centre de Recherche Agricole des Cerrados), de l'EMBRAPA (Entreprise Brésilienne de Recherche Agricole) et du CNPSo (Centre National de Recherche sur le Soja). La culture du soja représente alors 140000 hectares à Sorriso (1,5 million d'hectares au Mato Grosso) en 1990. Son importance ne cesse de croître jusqu'en 2005-2006 où elle atteint son maximum (600000 ha à Sorriso et 6,1 millions d'ha au Mato Grosso). Cette « avancée fulgurante » (Bertrand, 2004) s'explique par des cours du soja à la hausse qui incitent les producteurs à semer plus. La figure 1.22 illustre ce propos en comparant l'évolution des surfaces cultivées en soja au Mato Grosso et les prix de vente des produits en R\$ sur la période 1994-2007. Le coefficient de détermination entre les prix et les surfaces semées l'année suivante est de $R^2 = 0,78$ et démontre le lien existant entre ces deux variables. L'orientation du développement agricole vers une culture du soja vouée à l'exportation est un signe de l'évolution du front pionnier. Après le passage du front d'ouverture lié à l'arrivée de nombreux migrants qui cultivent du riz à faible rentabilité, l'arrivée de la culture du soja signale la mise en place d'un front économique dans les *cerrados*.

A côté des grandes exploitations agricoles et sous la pression des gens sans terre, se créent des exploitations de tailles plus réduites, de l'ordre d'une centaine d'hectares. Ces programmes de redistribution des terres menés par la municipalité en collaboration avec l'INCRA, suite à une vente de fazenda par exemple, pose le problème de la viabilité de ces exploitations car, selon l'EMBRAPA, une exploitation de cultures (soja, maïs) dans les *cerrados* n'est lucrative qu'à partir de 300 ha (Hubert-Moy *et al.*, 2002).

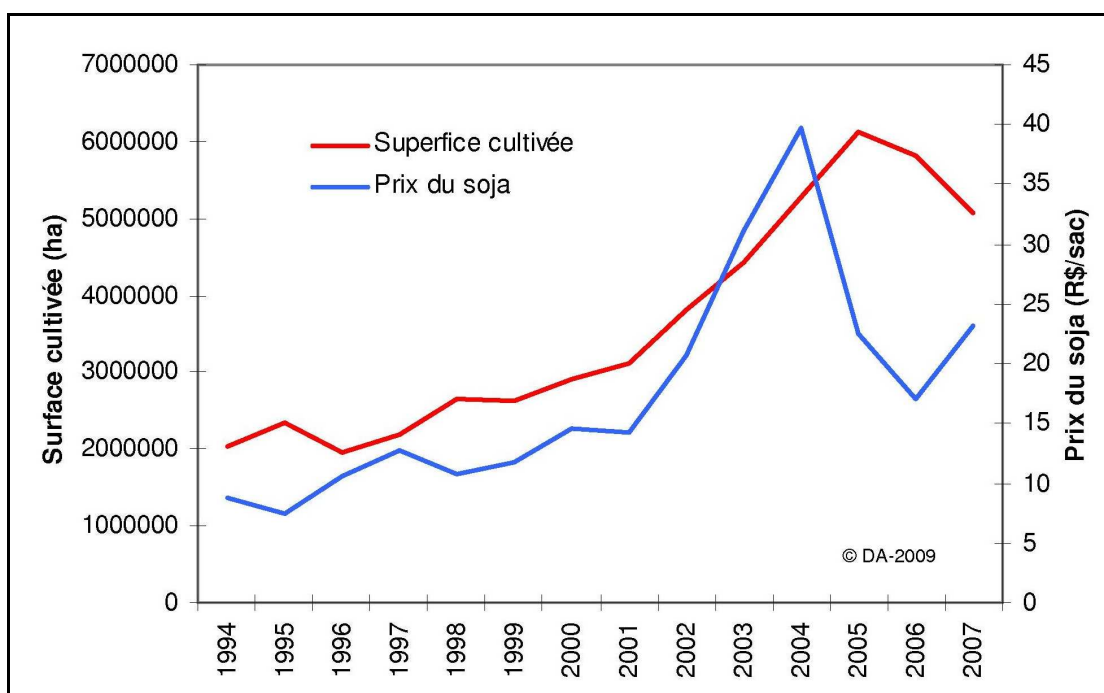


Figure 1.22 : Evolution comparée des superficies cultivées en soja au Mato Grosso et des prix du sac de soja (60 kg) au Mato Grosso entre 1994 et 2007. Le coefficient de détermination entre les prix et les superficies de l'année suivante est $R^2 = 0,78$. (source : IBGE)

Jusque dans les années 1980, ces migrations de petits colons en Amazonie restent encouragées par le gouvernement militaire. Mais, après la crise de 1989-1990, les problèmes économiques et sociaux que rencontrent ces familles les poussent, pour une partie d'entre elles, à quitter leurs terres pour rejoindre des « périphéries urbaines ». Ces dernières accueillent déjà de nombreux migrants venus d'autres régions du Brésil dans l'espoir de profiter du développement économique apporté par la mise en culture des *cerrados*. Après l'arrivée de nombreuses familles capitalisées du Sud, l'exode rural et l'urbanisation symbolisent donc une deuxième phase de migration dans l'histoire de l'occupation des *cerrados* (cf. encadré sur les sojiculteurs matogrossenses). Ces nouvelles arrivées participent à l'accroissement de la différenciation interne entre les classes sociales présentes en Amazonie. La ville de Sorriso n'échappe pas à la règle en accueillant dans les années 2000 une forte proportion de main d'œuvre en provenance du Nordeste (Maranhão). Les nouveaux migrants habitent des quartiers périphériques clairement séparés des noyaux urbains à l'origine de la colonisation qui restent habités par les « sudistes ». La ségrégation sociale est donc forte et ces derniers n'hésitent d'ailleurs plus à reconduire les nouveaux migrants chez eux en leur payant le voyage retour.

L'histoire de la colonisation du *cerrado* mato-grossense, analysée à travers l'exemple de Sorriso, présente bien l'évolution des fronts pionniers amazoniens. Les logiques économiques dirigent les migrations et contrôlent la démographie tandis que l'Etat reste en retrait. Mais, ce modèle de développement présente des limites environnementales, sociales et économiques qui apparaissent au grand jour lors de la crise des années 2004-2007.

Les sojiculteurs matogrossenses

La culture du soja au Mato Grosso s'est développée suite à la mise en place de projets de colonisation privés, publics ou mixtes (cf Partie 1 – Chapitre 2) qui ont causé de nombreux mouvements migratoires. Afin de mieux connaître les producteurs de soja du Mato Grosso, des entretiens biographiques ont été réalisés auprès de 32 producteurs. Ces entretiens ont été collectés dans le cadre du projet DURAMAZ¹. Le faible nombre de personnes rencontrées ne permet pas de tirer des conclusions statistiques significatives. Néanmoins, les résultats permettent de se faire une idée du profil standard du producteur de soja au Mato Grosso.

En 2007, l'âge moyen des producteurs rencontrés était de 48 ans. La grande majorité d'entre eux est née dans le sud du pays (14 au Rio Grande do Sul, 9 en Santa Catarina, 8 dans le Parana et 1 à São Paulo). Si l'on remonte à la génération précédente, 24 producteurs sont en fait descendants de *gauchos* (fils de personnes nées dans le Rio Grande do Sul), 5 ont des racines dans le Santa Catarina, 2 à São Paulo et 1 en Ukraine. Enfin, si l'on s'intéresse aux descendants européens de ces producteurs, 26 sont d'origine italienne, 3 sont d'origine allemande et 2 sont d'origine ukrainienne. On reconnaît donc ici un parcours de migration (fig. 1.23) au cours duquel les premiers arrivants européens, italiens notamment, sont venus s'installer dans l'Etat du Rio Grande do Sul. Leurs descendants ont ensuite poursuivi la migration en remontant vers le nord, dans les Etats de Santa Catarina et du Parana. Enfin, la dernière génération a migré vers le Mato Grosso qui est devenu le nouvel eldorado des agriculteurs brésiliens (Le Borgne-David, 1998).

Cette dernière migration s'est faite à la fin des années 1980 (la date moyenne d'arrivée à Sorriso est 1989). Cependant, certains d'entre eux sont arrivés dès la fin des années 1970 et d'autres à la fin des années 1990. Ces producteurs avaient en moyenne 30 ans lors de leur migration. Plus précisément, 14 d'entre eux sont arrivés avec moins de 25 ans, 10 avaient entre 25 et 40 ans et seulement 8 avaient plus de 40 ans. Ce sont donc en majorité des jeunes adultes qui se sont installés à Sorriso dans l'optique d'y construire leur vie. Parmi les personnes qui sont arrivées à Sorriso à un âge plus avancé, certains ont acheté leurs terres dans les années 1980 mais ne s'y sont installés bien plus tard. Ils ont préféré rester un temps dans le sud afin d'éduquer leurs enfants avant de prendre le chemin du Mato Grosso pour s'occuper de leurs terres. La grande majorité des producteurs a donc un projet de vie axé depuis longtemps sur leur fazenda au Mato Grosso.

La recherche d'une vie meilleure, de la possibilité de devenir propriétaire de sa terre, est la principale raison qui a poussé les personnes à migrer. Cependant, 8 personnes parmi les 32 interrogées sont venues en ayant déjà un contact familial à Sorriso. Il est courant de rencontrer des jeunes venus tenter l'aventure matogrossense en suivant les traces d'un oncle ou d'un autre parent. Dans certains cas, plus rares, ce sont les parents qui, une fois leurs enfants installés au Mato Grosso, viennent rejoindre ces derniers à Sorriso.

¹ En 2007, un nouveau programme de recherche financé par l'ANR vise à étudier une quinzaine d'expériences de développement durable en Amazonie brésilienne afin d'analyser quels en sont les déterminants géographiques et socio-économiques. http://www.iheal.univ-paris3.fr/rubrique.php3?id_rubrique=361

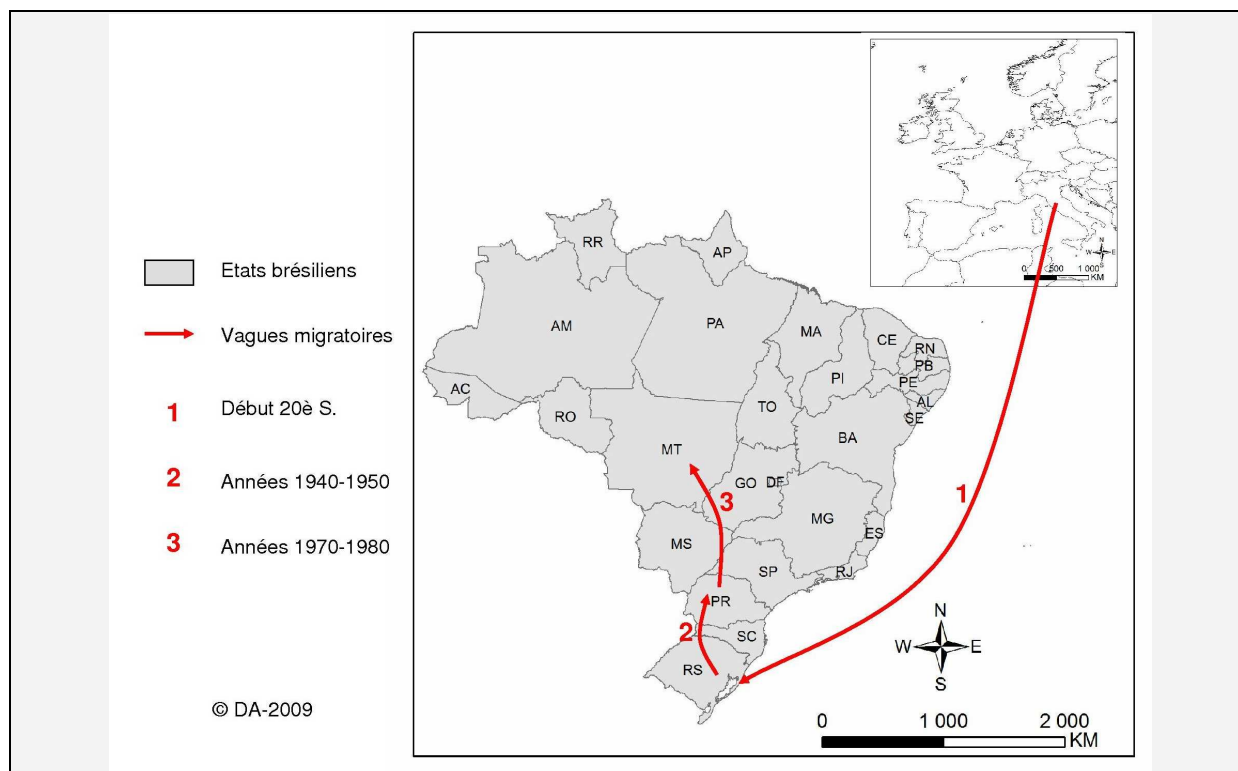


Figure 1.23 : Vagues migratoires successives des familles des sojiculateurs matogrossenses.

Par ailleurs, 31 producteurs sur 32 viennent de régions rurales du sud du Brésil (seule une personne est née à São Paulo capitale). 23 d'entre eux sont fils de producteurs, 4 sont fils d'ouvriers du secteur secondaire et 5 sont fils de commerçants. La grande majorité des producteurs est donc issue du milieu agricole. Cependant, aujourd'hui, seuls 7 vivent dans leurs fazendas. En effet, nombre d'entre eux se contentent d'administrer la fazenda et délèguent le travail agricole à leurs employés. Ceci indique que, même si ces familles retirent toujours leurs revenus principaux de l'agriculture, leur mode de vie est beaucoup moins rural qu'il l'était lorsque ces personnes habitaient dans le sud. Cela se ressent notamment dans le niveau d'éducation des producteurs et de leurs enfants. Seulement 9 propriétaires ont étudié après le lycée (parmi lesquels 1 n'est pas issu du milieu agricole et 3 sont déjà fils d'agriculteurs ayant migré à Sorriso), 11 n'ont pas terminé le collège et 12 ont été jusqu'au lycée. Le niveau d'éducation des personnes ayant migré au Mato Grosso est donc plutôt faible. Par contre, parmi les 55 enfants de plus de 20 ans en 2007 qui ont été recensés (sur un total de 85 enfants), 38 ont étudié après le lycée. On a donc, d'un côté, un rapport indiquant que 28% des producteurs ont un niveau scolaire supérieur, et de l'autre côté, 69% de leurs enfants ont un niveau scolaire supérieur. On peut donc affirmer que la migration au Mato Grosso s'est traduite par une amélioration du niveau de vie pour ces familles. On notera ici d'ailleurs qu'il existe d'ores et déjà deux universités à Sorriso (ville fondée en 1986 seulement !).

Cette amélioration du niveau de vie est d'ailleurs confirmée par les revenus moyens mensuels annoncés par les familles de producteurs (selon 19 producteurs). Ces revenus sont de l'ordre de 10000 R\$, soit 4000 €. Ce chiffre n'apas de valeur officielle car les producteurs ne font pas toujours bien la différence entre leur salaire mensuel et les revenus de leur fazenda. Mais, il indique tout de même que ces familles ont dans l'ensemble une situation relativement aisée.

3. La prédominance du soja : une source de fragilité économique

3.1. La crise économique de 2004 à 2007

A Sorriso, première commune productrice de soja du pays, la monoculture du soja résultant de la « Révolution Verte » s'est imposée. La *sojiculture* représente 90% de l'économie de la commune, ce qui la rend vulnérable aux variations de rendements. L'apparition en 2003 de la maladie de la rouille asiatique a fait fortement chuter les rendements (fig. 1.18) causant une perte de 150 millions de R\$. Des aléas climatiques particuliers peuvent également entraîner les rendements à la baisse. Cette baisse de la rentabilité et l'augmentation sensible du prix du foncier (provoquée par les années fastes 2000-2003) ont alors incité les producteurs de soja à rechercher de nouvelles terres moins chères dans les municipes voisins de Vera et Santa Carmen ; ils y représenteraient 60 à 70% des nouvelles acquisitions. Ce sont en fait surtout les enfants des propriétaires de Sorriso qui poursuivent le processus d'intégration de nouvelles terres à l'agriculture productiviste, la famille conservant le plus souvent la fazenda « maison mère » à Sorriso. Le mouvement d'expansion est aussi très marqué en direction du Pará, autour de quelques pôles de développement le long de la BR-163, comme à Castelo dos Sonhos et à Novo Progresso (Mendez del Villar *et al.*, 2005). Après l'arrivée de la première génération de colons dans les années 1970-1980, les colons de la seconde génération poursuivent donc le cycle de vie de l'exploitation familiale en acquérant de nouvelles terres en avant du front pour pratiquer une agriculture capitaliste. Le boom économique du soja continue ainsi d'être le moteur de l'avancée du front et l'intensification agricole ne semble qu'accélérer ce processus.

A partir de 2004, la filière agricole plonge dans une crise économique grave due à la revalorisation du Real par rapport au Dollar et à une augmentation constante des coûts de production, notamment du coût des intrants, des équipements agricoles et du fret.

La dévalorisation du real a pour conséquence de faire chuter les cours du soja au Brésil alors que les cours en Dollars restent stables (fig. 1.24). A l'échelle brésilienne, la baisse du taux de change à partir de 2003 est compensée dans un premier temps par une hausse du cours du soja en dollars. Ce n'est qu'à partir de 2006 que les prix chutent en R\$. La situation est toutefois quelque peu différente au Mato Grosso où le prix du sac de soja (60 kg) chute dès la récolte 2004-2005 (fig. 25). Cette baisse se prolonge l'année suivante de telle sorte que le cours du sac de soja est passé de 39 R\$ en 2004 à 17 R\$ en 2006 (tableau 1.4). Si l'agriculture Mato Grossense a ressenti plus durement la crise que les autres Etats producteurs de soja, elle le doit à sa localisation géographique éloignée des axes d'importation et d'exportation. Les grandes régions de production sont effectivement situées à plus de 2000 kilomètres des ports de commerce tels que Paranagua et Santos (Théry, 2004). Or, on estime qu'en 2006 le prix du transport par tonne de soja entre le Nord du Mato Grosso et le port de Paranaguá dans le Paraná était de 77 US\$, soit plus du tiers de la valeur du produit (208 US\$/tonne selon la FAO). Ce tarif, affecté par la chute du dollar et la hausse des prix des carburants, a même été ré estimé à 108 US\$ en 2007.

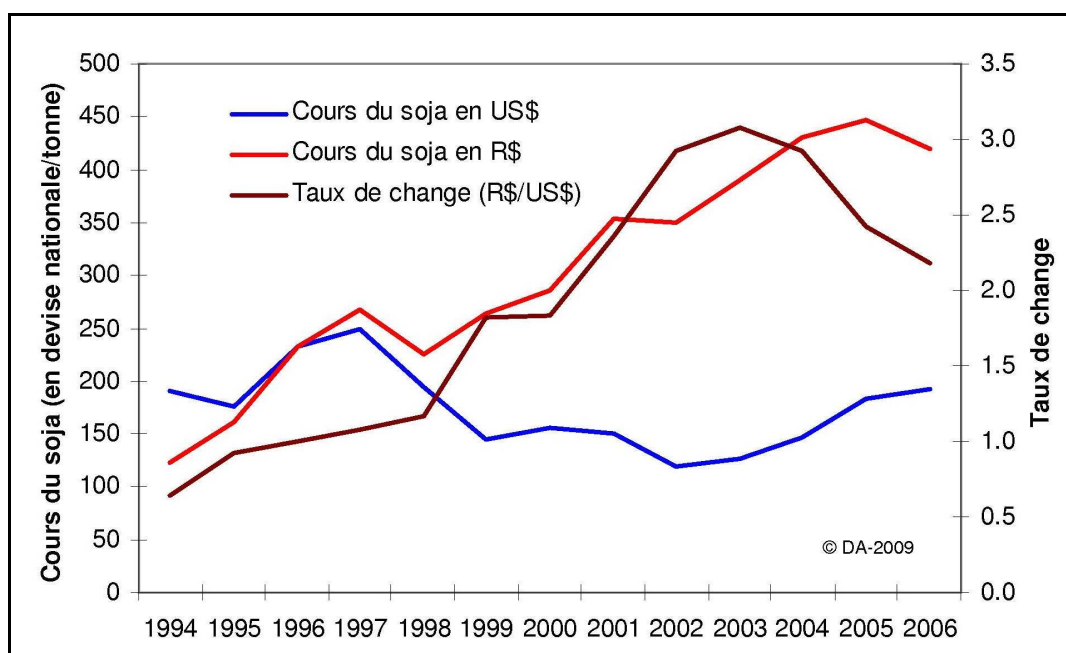


Figure 1.24 : Evolution comparée du cours du soja au Brésil (en US\$ et en R\$) et du taux de change Dollar/Real entre 1994 et 2006 (Source : FAOSTAT).

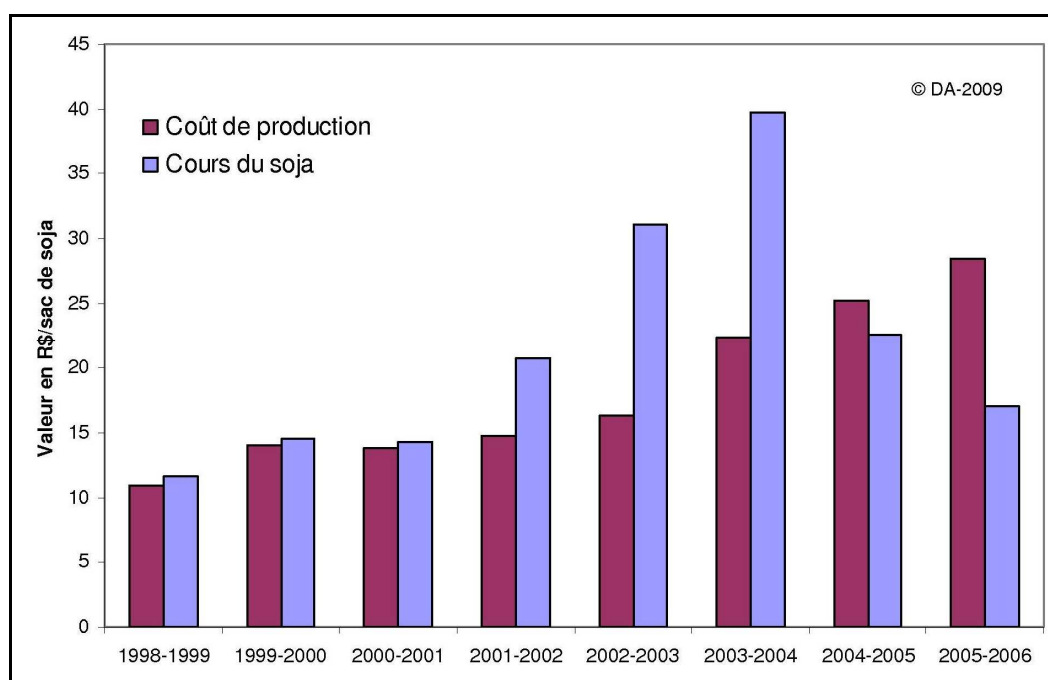


Figure 1.25 : Evolution des cours du soja et des coûts de production de soja au Mato Grosso entre 1998 et 2006 (Source : CONAB/IBGE).

Au Mato Grosso, ce coût de fret dévalue les cours du soja et renchérit les coûts de production comme le montre une simple comparaison (tableau 1.4) entre les Etats du Mato Grosso et du Parana (2^{ème} Etat producteur de soja) pour les années 2003-2004 (avant la crise) et 2005-2006 (pendant la crise). Les deux années, les prix d'achat du soja sont inférieurs au Mato Grosso tandis que les coûts de production y sont supérieurs. Cela est surtout vrai durant la crise où le sac de soja mato-grossense se vend 8 R\$ moins cher que son homologue du sud alors que les coûts de production y sont 3R\$ plus élevés. Les différences observées dans les coûts de production sont surtout dues aux coûts variables. Les semences, fertilisants et

pesticides sont plus chers au Mato Grosso (notamment les fertilisants qu'il faut appliquer en plus grande quantité pour corriger les sols du *cerrado*). Le coût de transport du soja jusqu'au lieu de stockage est également supérieur au Mato Grosso car les routes sont de piètre qualité et les distances à parcourir sont souvent très grandes. Ces désavantages entraînent des différences dans les coûts opérationnels entre les deux Etats de l'ordre de 2 R\$/sac en 2004. Ces écarts sont compensés par la valorisation foncière qui est plus élevée au Parana qu'au Mato Grosso. Cette comparaison met donc en opposition une région de production de front pionnier (avec des coûts variables élevés et une valorisation foncière faible) et une région de production stabilisée (avec des coûts variables plus faibles mais une valorisation foncière plus élevée). Cela implique que les producteurs de ces deux Etats souhaitant augmenter leurs profits adoptent des stratégies différentes. Pour le producteur paranaense, il est moins coûteux d'augmenter la production en investissant dans des nouvelles technologies qu'en agrandissant son exploitation. Au contraire, étant donné le faible coût de la terre et le coût élevé des intrants agricoles et du transport, le producteur mato-grossense a intérêt à agrandir son exploitation plutôt qu'à intensifier sa production. On comprend donc mieux pourquoi les années fastes du soja s'accompagnent d'une forte augmentation des superficies cultivées (corrélation de 0,78 entre les cours du soja et les superficies cultivées, cf p.7).

Coût de production (en R\$/60 kg)	2003-2004		2005-2006	
	Mato Grosso	Parana	Mato Grosso	Parana
Semences	1.65	2	2.42	2
Fertilisants	5.75	2.53	7.59	3.09
Pesticides	4.28	3.73	5.19	4.68
Autres (main d'œuvre, location de matériel...)	2.61	5.27	2.63	5.32
Dépenses pour l'entretien des cultures A	14.29	13.53	17.83	15.09
Dépenses post-récolte (inclus le transport jusqu'au lieu de stockage du soja) B	2.46	2.1	2.67	2.39
Dépenses financières C	1.01	0.46	1.3	0.49
Coût variable (A+B+C = D)	17.76	16.09	21.8	17.97
Coût fixe (Dépréciation de machines...) E	3.62	3.07	5.34	4.08
Coût opérationnel (D+E = G)	21.38	19.16	27.14	22.05
Autres coûts (inclus la valorisation foncière) H	1.52	3.62	2.03	4.09
CUSTO TOTAL (H+G = I)	22.9	22.78	29.17	26.14
<i>source: CONAB/DIGEM/SUINF/GECUP</i>				
Prix de vente su soja	39.76	42.48	17.09	24.75
<i>source: IBGE</i>				

Tableau 1.4 : Comparaison des coûts de production et des prix de vente du soja au Mato Grosso et au Parana pour les récoltes 2003-2004 et 2005-2006.

La crise apparue en 2004 accentue les différences entre ces deux régions. Les coûts de production augmentent plus au Mato Grosso (+6R\$/sac) qu'au Parana (+3,5R\$/sac) et les prix de vente baissent plus au Mato Grosso (-22R\$/sac) qu'au Parana (-18R\$/sac). Les producteurs mato-grossense en arrivent donc à produire à perte. La vulnérabilité de l'économie du front pionnier face à la conjoncture internationale se fait durement ressentir au Mato Grosso.

La crise révèle alors un lourd endettement des producteurs. Celui-ci est dû à un suréquipement des fazendas et à la course à l'exploitation de nouvelles terres. En effet, de

nombreux producteurs ont emprunté auprès des banques et des multinationales¹ pour mettre en oeuvre leurs stratégies d'expansion pendant les années dorées du soja. Incapables de rembourser leurs dettes, y compris les crédits de campagne souvent contractés auprès de groupes privés (Bertrand *et al.*, 2005), bon nombre de producteurs ont dû renoncer à semer du soja sur une partie de leurs terres. Celles-ci ont alors été mises en pâturages ou louées à d'autres producteurs mieux capitalisés, favorisant la concentration foncière (à Sapezal, le nombre d'exploitations est passé de 98 à 73 entre 2006 et 2007). En conséquence, les superficies semées en soja ont reculé en 2006 et 2007 (de 6,1 millions d'hectares en 2005 à 5,8 en 2006 puis 5 millions en 2007 selon l'IBGE).

Pour faire face à l'endettement des producteurs, l'Etat Fédéral a dû intervenir pour différer le remboursement des dettes contractées sur le système officiel auprès des banques. Une autre mesure reste encore à redéfinir concernant le coût financier du crédit. En effet, au Brésil, la politique monétaire poursuivie de manière constante depuis plus de 15 ans, vise à maintenir des taux d'intérêt élevés : 18% pour les taux courants à la consommation et 8,75 % pour le crédit rural alors que l'inflation ne dépasse pas désormais les 3% par an. Des propositions actuelles visent ainsi à diviser par deux le coût du crédit, mais il est peu probable que le gouvernement fédéral applique à court terme une telle mesure par crainte de voir l'inflation augmenter fortement.

La crise du soja tend ainsi à montrer les limites économiques du modèle brésilien d'agriculture industrielle lorsqu'il est transposé sur un front pionnier. Elle a aussi mis en avant les limites environnementales et sociales de l'avancée du front économique du soja.

3.2. Les limites socio-environnementales du « modèle » matogrossense

Le problème environnemental majeur lié au développement du front économique du soja concerne les changements d'occupation du sol. L'expansion des terres cultivées représentant le moyen le moins coûteux d'augmenter la production, la forêt a largement cédé la place à une utilisation urbaine ou agricole de l'espace. Les 57 scieries encore en activité à Sorriso dans les années 1980 symbolisent les nombreux déboisements qui ont été réalisés dans la région (fig. 1.26).

Selon les données de l'INPE, avec 11 794 700 ha de forêt ou cerrado défrichés entre 1990 et 2007, le Mato Grosso est l'Etat ayant le plus déboisé en Amazonie Légale (environ 37% du total défriché annuellement). Etant donné que l'IBGE (Institut Brésilien de Géographie et de Statistique) estime l'expansion des surfaces cultivées en soja sur la même période à 4 568 814 hectares (de 1 552 910 ha en 1990 à 6 121 724 ha en 2005, année de superficie cultivée maximale), cette culture peut donc facilement être considérée comme étant une des principales responsables de la déforestation dans cet Etat (potentiellement près de 39% du défrichement). Les graphes de la figure 1.27 indiquent qu'il existe bien une forte relation entre les superficies annuellement défrichées à l'année t , les profits du soja cette même année et les superficies nouvellement mises en culture l'année $t+1$ (en considérant donc que les parcelles ne peuvent pas être mises en culture la même année que leur déboisement). Ces liens sont confirmés par Morton *et al.* (2006) qui ont estimé à partir de données satellitaires que, sur la période 2001-2004 (donc avant la crise), plus de 540000 ha de forêts au Mato Grosso ont directement été transformés en culture. Toutefois, ces mêmes auteurs précisent que, en 2003, année de pic de déforestation, les conversions directes de forêt en

¹ Les multinationales financent les productions en prêtant les intrants contre une partie de la production.

cultures n'ont concerné que 23% du total des surfaces défrichées. En fait, une partie du soja s'est répandue sur des parcelles anciennement défrichées (Brandão *et al.*, 2006).

En remplaçant la forêt ou le *cerrado*, la monoculture du soja réduit la biodiversité. Or, celle-ci est notamment nécessaire au contrôle des maladies. Selon Altieri (1999), « *the instability of agroecosystems, which is manifested as the worsening of most insect pest problems, is increasingly linked to the expansion of crop monocultures at the expense of the natural vegetation, thereby decreasing local habitat diversity. Plant communities that are modified to meet the special needs of humans become subject to heavy pest damage and generally the more intensely such communities are modified, the more abundant and serious the pests* ». Le même auteur indique donc cinq points qui permettent de réduire la vulnérabilité des cultures faces aux maladies : (1) diversité de cultures avec une forte mixité dans le temps et l'espace, (2) discontinuité des monocultures dans le temps grâce aux rotations, (3) petites parcelles afin de créer une mosaïque de cultures et de parcelles non cultivées, (4) exploitations avec une culture pérenne dominante, (5) forte diversité génétique dans les variétés semées (Altieri, 1999). Au Mato Grosso, aucune de ces conditions n'est respectée, excepté le second point dans certaines régions où les systèmes de production en double cultures se sont généralisés. Ainsi, en 2002-2003, une nouvelle maladie du soja est apparue dans les champs de soja : la rouille asiatique. L'apparition de cette maladie est, selon la Fundação MT¹, liée aux pratiques monoculturelles appliquées au Mato Grosso. Elle a entraîné de nombreuses pertes de rendements et forcé les producteurs à appliquer plus de fongicides qu'auparavant, ce qui fait donc monter les coûts de production et pollue les sols et les eaux de la région.

Le problème de l'eau est crucial au Mato Grosso. En effet, même si les berges des cours d'eau sont protégées par la loi depuis 1989 sous le statut d'aires de protection permanente (APP), les déboisements des trente années écoulées en ont dégradé une bonne partie (par exemple 4900 ha de APP dégradées sont recensées à Sorriso). Or ces berges ont l'intérêt de limiter l'érosion des sols et la pollution des eaux liée à l'emploi de produits chimiques prônés dans le cadre de la « Révolution Verte ». D'après les enquêtes de terrain réalisées, la culture du soja nécessite 6 à 7 applications de produits phytosanitaires tandis que ces chiffres peuvent monter jusqu'à 16 ou 17 dans le cas du coton. Ainsi, dans une étude du bassin du fleuve Teles Pires (qui coule à Sorriso), Zeilhofer et Fonseca (2007) ont démontré que les concentrations en nitrate (NO) et ammonium (NH₄) avaient augmenté notamment près des centres de productions agricoles. Toutefois, il convient de préciser que les taux restent encore inférieurs aux normes autorisées par les lois brésiliennes.

La gestion de la qualité de l'eau est un enjeu sanitaire important à prendre à compte dans la gestion des conflits sociaux, notamment avec les populations indigènes. L'ISA (Institut Socio-Environnemental) a lancé une campagne de suivi de la qualité de l'eau et d'incitation au reboisement des APPs dans le bassin du fleuve Xingu dont une partie des terres sont protégées dans la terre indigène Xingu. Or, les sources de ce fleuve naissent en dehors de la réserve, dans les régions de production de soja et de coton. Ainsi, la pollution engendrée par les pratiques agricoles menace directement les modes de vie indigènes au sein de la réserve. La situation est la même à Juina où vit la population Enawene Nawe, située en aval de la Chapada dos Parecis (région de production située à l'ouest du Mato Grosso). Cette tribu entretient un mode de vie traditionnel dont l'alimentation est entièrement basée sur la pêche, laquelle est aujourd'hui remise en question par les pollutions d'origines agricoles.

¹ <http://amazoniavivasantarem.blogspot.com/2006/08/fundao-mt-diz-que-doenas-so.html>

Certaines communautés de producteurs familiaux se plaignent également de la pollution des eaux par les fazendas de coton à São José do Rio Claro.

Mais les problèmes de santé ne touchent pas que les communautés traditionnelles. Les pratiques de feux et brûlis¹ comme les fumées dégagées par les scieries implantées en périphérie des villes ont un impact fort sur la qualité de l'air dans tout l'Etat. Ces feux sont à l'origine d'une pollution atmosphérique gênante pour la population qui se traduit par des gênes respiratoires, visuelles et olfactives en période sèche. Enfin, les applications de pesticides effectuées par avions sont parfois mal maîtrisées. Les vents peuvent détourner les produits chimiques sur les zones habitées qui sont généralement entourées de cultures. Ce problème est notamment reconnu à Campo Novo do Parecis et à Lucas do Rio Verde. Dans cette dernière commune, le président du Syndicat des Travailleurs Ruraux² qui a dénoncé le problème a même dû quitter la commune après avoir reçu des menaces, symbolisant les conflits sociaux entre petits et grands producteurs.

¹ pratiques typiques de la colonisation consistant à mettre le feu aux parcelles pour les nettoyer et amender les sols avant de cultiver

² Syndicat représentant les ouvriers agricoles et les producteurs traditionnels. Les grands producteurs sont réunis dans le Syndicat Rural.

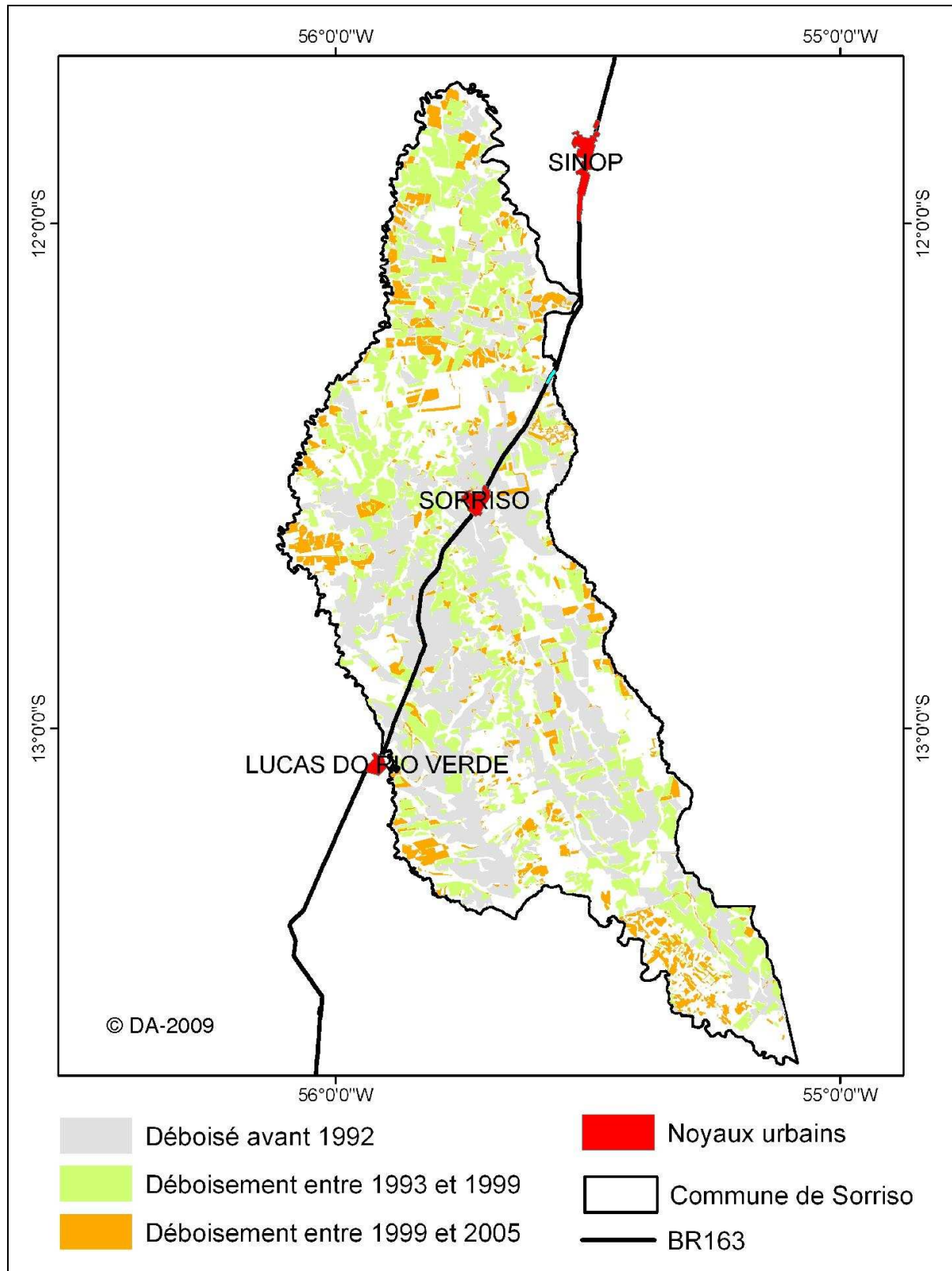


Figure 1.26 : Evolution de la déforestation dans la commune de Sorriso (d'après les données fournies par le Secrétariat de l'Environnement du Mato Grosso - SEMA MT).

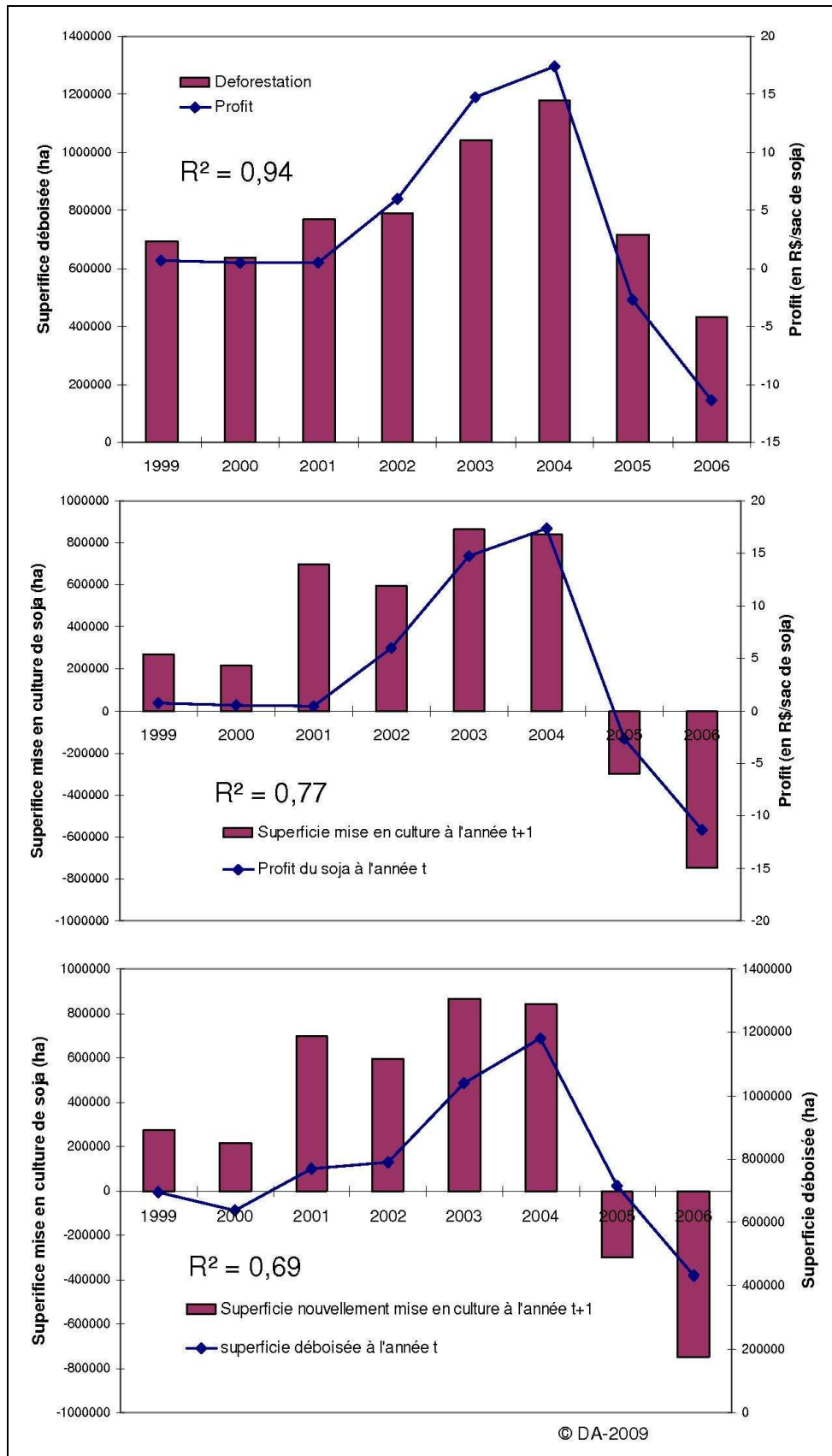


Figure 1.27 : Relations entre les superficies déboisées et les profits du soja à l'année t et les superficies mises en culture à l'année t+1. Ce délai d'un an est nécessaire pour prendre en compte le fait que des profits du soja intéressants à l'année t vont inciter les producteurs à déboiser la même année afin d'augmenter les surfaces cultivées en soja l'année suivante (t+1).

4. Les tentatives d'adaptation : diversification, développement durable

Le développement agricole des années 1990-2000 a donc clairement montré ses limites avec l'arrivée de la crise en 2004. Le mode d'intensification agricole développé durant la « révolution verte » a débouché sur une monoculture modernisée et productive mais aux impacts environnementaux forts sur la biodiversité, les sols et les cours d'eaux. De plus, l'intensification n'a pas freiné la déforestation. Au contraire, les cours du soja élevés et les prix prohibitifs des intrants agricoles ont viabilisé les déboisements. L'agriculture mato-grossense doit donc à présent s'orienter vers un développement plus sûr économiquement et plus respectueux de l'environnement. On assiste donc aujourd'hui à l'arrivée du front d'intensification axé sur le développement de l'agriculture de conservation ou de l'intensification écologique. De nouvelles pratiques sont adoptées et des projets environnementaux régionaux et locaux se développent.

4.1. L'adoption de nouvelles pratiques culturales

4.1.1. La diversification

Des prix moins élevés et un taux de change avec le dollar moins favorable depuis 2005 ont contribué à une prise de conscience de la part des producteurs sur la nécessité, entre autres, de trouver d'autres sources de revenus. En 2007, la surface semée en soja dans le Mato Grosso a ainsi été estimée à la baisse de 17% (5,075 millions d'ha en 2007) par rapport au maximum atteint en 2005 (IBGE). Au cours de cette même période, les cultures de coton ont augmenté de 16% (560 000 ha en 2007) et celles de maïs (semé en deuxième récolte après le soja) se sont accrues de 53% (1,65 millions d'ha en 2007). Cette progression du maïs s'explique notamment par le développement d'un marché international de l'éthanol au sein duquel les Etats-Unis ont misé sur la culture du maïs (Bertrand *et al.*, 2008). Dès lors, en 2006-2007, ces derniers ont réduit leurs surfaces cultivées en soja pour les transformer en maïs (-15,7% de soja semé entre 2006 et 2007 selon l'USDA). Les producteurs brésiliens y ont alors vu un signe positif qui aurait pu faire remonter les cours du soja et du maïs. Mais les taux de change défavorables ont annihilé ces espérances...

De même, la culture de la canne à sucre devrait croître dans les années à venir suite aux récentes annonces gouvernementales déclarant l'intention du pays de continuer à développer le marché des biocarburants au Brésil. Cette expansion est liée à l'espoir de voir apparaître un marché mondial des biocarburants avec des prévisions de semis de 17 millions d'hectares au Brésil en 2025, dont une majeure partie de la croissance se fera dans les *cerrados* (Cerqueira Leite *et al.*, 2009). Cela peut donc représenter une aubaine pour les producteurs mato-grossense. Le problème est que cette culture n'est rentable que dans certaines conditions et notamment si les productions sont situées à moins de 60 km des centres de transformation (comme c'est le cas à Campo Novo do Parecis par exemple). Or il n'existe actuellement que 12 centres de transformations au Mato Grosso (UDOP¹). A l'échelle du Mato Grosso, il est tout de même prévu de planter plus de 1 million d'hectares de canne à sucre et de créer de nouvelles usines au Sud-Est de l'Etat proche des axes de communication vers les grands centres de consommation du Centre Ouest et du Sud-Est du Brésil (São Paulo, Rio de Janeiro).

¹ UDOP : União dos Produtores de Bioenergia, Relação das Unidades de Açúcar, Álcool e Biodiesel do Mato Grosso : <http://www.udop.com.br/>

Enfin, la culture du coton se développe également mais concerne surtout les plus grandes fazendas car elle nécessite des investissements lourds en machines agricoles et en intrants. Son exploitation concerne surtout le sud-est de l'Etat (les communes de Primavera do Leste et Campo Verde sèment plus de 25% du coton mato-grossense) même si quelques producteurs, surtout dans la Chapada dos Parecis, sèment aujourd'hui le coton en succession du soja.

Pour illustrer ceci, l'exemple de la commune de Sorriso, considérée comme le symbole du soja au Mato Grosso et au Brésil, est particulièrement intéressant à traiter car toutes les solutions expérimentées dans la région se retrouvent testées sur ce territoire de 9.328 km². Le soja y a servi de moteur du développement et, à présent qu'il n'y a plus de nouvelles terres à défricher à Sorriso, les producteurs sont entrés dans une phase de diversification pariant sur ces trois nouvelles cultures citées précédemment : le maïs, le coton et la canne à sucre.

Le maïs (95166 ha en 2006 à Sorriso) est semé en deuxième récolte après la culture du soja et ne constitue donc pas vraiment un concurrent pour ce dernier (fig. 1.28). Là où la situation change est que, il y a encore 4-5 ans, le maïs était considéré comme une culture « bonus » n'ayant pas vraiment de valeur économique par rapport au soja. Le rapport de poids a aujourd'hui tendance à s'équilibrer entre les deux cultures dans les mentalités des producteurs. Suite à la baisse des prix du soja, le maïs s'impose de plus en plus comme une culture pouvant être une alternative rentable (fig. 1.29) et il devient alors acceptable de changer les pratiques culturales du soja (en semant plus tôt par exemple) pour améliorer celles du maïs.



Figure 1.28 : Culture de maïs à Sorriso (Source : D. Arvor, 2007).

La situation de la culture du coton (7730 ha en 2006 à Sorriso) est en certains points similaire à celle du maïs. Le coton peut être cultivé en deuxième récolte ou en récolte simple

(avec un cycle plus long). Ainsi, tout comme le maïs, le coton est de plus en plus perçu comme un complément à la culture du soja et non un concurrent. Mais, une des différences notoires par rapport au maïs est que la culture du coton nécessite un matériel et des infrastructures spécifiques. Alors que la culture du maïs peut se réaliser avec le même matériel déjà utilisé pour le soja, la production du coton nécessite de lourds investissements que peu de personnes peuvent aujourd'hui se permettre de réaliser. En conséquence, cette culture concerne aujourd'hui deux types de producteurs. D'une part, ceux qui ont investi dans la culture du coton au lieu d'investir dans de nouvelles terres quand le soja était en plein essor. D'autre part, les très grandes sociétés productrices qui ont «verticalisé» leur activité (semenciers de soja, exportateurs...) et qui ont donc mieux supporté la crise du soja. Elles ont ainsi pu se réorienter à temps vers d'autres cultures. Cependant, il est à noter que la culture du coton à Sorriso dépend essentiellement du premier type de producteurs ici présenté.

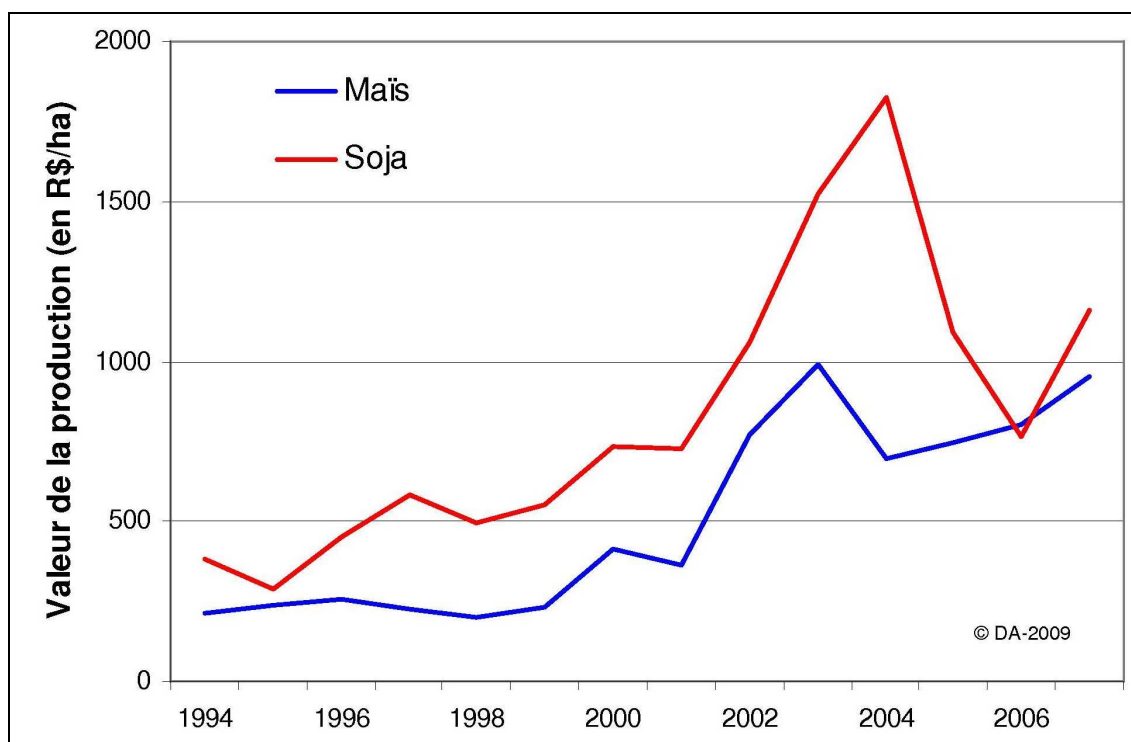


Figure 1.29 : Evolution des cours du soja et du maïs en reals par hectare au Mato Grosso (source : IBGE)

La culture de la canne à sucre à Sorriso en est encore à ses débuts tandis qu'à l'échelle du Mato Grosso, il en existait déjà 220 000 ha en 2007 (IBGE). Pour pouvoir s'intégrer dans cette nouvelle filière, 15 producteurs de soja de Sorriso ont décidé de s'unir pour créer une usine sur la commune qui pourra traiter les 30 000 ha qu'ils souhaitent planter en canne à sucre. Dans ce cas, cette dernière devrait entrer directement en lieu et place du soja. Par contre, le groupe étant fermé, les surfaces cultivées ne devraient pas évoluer pendant plusieurs années.

Certains producteurs ont également investi dans d'autres projets de diversification dans l'optique de réduire leurs coûts de production. Face à la hausse des prix du pétrole, certaines parcelles de tournesol sont apparues afin de produire du biocarburant réutilisable dans les machines agricoles des exploitations. De même, les plantations d'eucalyptus se sont sensiblement développées. En effet, de nombreux producteurs ont choisi de réserver quelques hectares à ces arbres dont le bois alimentera ensuite les séchoirs de soja.

Enfin, les municipalités essaient de stabiliser l'économie à leur échelle en attirant des industries de transformation sur le territoire communal comme c'est le cas des entreprises agro-alimentaires Perdigo, Sadia et Anhambi à Nova Mutum, Lucas do Rio Verde et Sorriso, respectivement.

4.1.2. Les biotechnologies : intérêts et limites du Soja Génétiquement Modifié

L'introduction des variétés de soja génétiquement modifiées (SGM) est souvent présentée par les instituts de recherche et les producteurs comme un moyen d'accroître la compétitivité des producteurs. En effet, ces variétés doivent permettre d'abaisser les coûts de production grâce à une moindre utilisation des herbicides et, d'une manière générale, à une simplification dans la conduite de la culture. L'adoption de ces techniques s'intègre donc dans les principes de la « Révolution Verte ». Dès la première campagne officielle de SGM en 2005/06, la réduction dans le coût en herbicides a été d'environ 8% des charges variables et de 6% sur les charges totales (Mendez del Villar *et al.*, 2007). Toutefois, lors de la campagne suivante, les avantages observés ont commencé à s'estomper et même à s'inverser en 2007-2008 en raison de l'augmentation du prix du glyphosate (unique herbicide utilisé en SGM), du paiement de royauté et du manque de gain de productivité par hectare (tableau 1.5). Les rendements des SGM sont équivalents, voire plus faibles, par rapport aux cultures conventionnelles du fait de leur manque d'adaptation aux conditions agroclimatiques du Mato Grosso. Cette faible efficacité est surtout due au retard accumulé par la recherche brésilienne puisque les SGM ne sont autorisés que depuis 2004. Ainsi, l'adoption des cultures transgéniques au Mato Grosso ne dépasse pour le moment pas les 25% des surfaces en soja contrairement aux attentes des grandes firmes semencières et de commerce de grains. L'annonce par la recherche publique brésilienne (Embrapa) de la mise sur le marché de nouvelles semences transgéniques résistantes à la maladie de la rouille asiatique pourrait à présent redynamiser ce secteur¹.

¹ Rocha, D., (2008), Grãos de soja resistente à ferrugem asiatica devem ser comercializados para safra de 2010. <http://www.ambienteemfoco.com.br/?p=5987>. Accédé le 03/04/2008.

Coût de production (en R\$/60 kg)	2007-2008	
	Conventionnel	SGM
Semences	1.07	1.07
Fertilisants	7.52	7.52
Pesticides	3.65	4.48
Autres (main d'œuvre, location de matériel...)	2.98	3.98
Dépenses pour l'entretien des cultures A	15.22	17.05
Transport Externe	0.84	0.84
Royaltie	0	0.44
Autres (assistance technique...)	2.86	2.92
Dépenses post-récolte B	3.7	4.2
Dépenses financières C	0.88	0.93
Coût variable (A+B+C = D)	19.8	22.18
Coût fixe (Dépréciation de machines...) E	2.48	2.48
Coût opérationnel (D+E = G)	22.28	24.66
Autres coûts (inclus la valorisation foncière) H	3.74	3.75
CUSTO TOTAL (H+G = I)	26.02	28.41

source: CONAB/DIGEM/SUINF/GECUP

Tableau 1.5 : Comparaison des coûts de production pour un semis de soja conventionnel et un semis de Soja Génétiquement Modifié (SGM) à Sorriso en 2007-2008 (Source : CONAB).

Toutefois, deux éléments peuvent freiner l'adoption généralisée des semences transgéniques :

- l'adoption des nouvelles variétés de soja pose le problème de la différenciation du SGM et du soja conventionnel lors de la vente de la récolte aux multinationales de la région (fig. 1.30).

- le consommateur européen étant réticent aux cultures transgéniques, il existe un marché intéressant pour le soja conventionnel. Or, les principaux centres de production de soja dans le monde (Etats-Unis, Argentine et même le sud du Brésil) ont largement adopté les semences transgéniques. Le Mato Grosso pourrait donc avoir intérêt à conserver une partie de sa production en soja conventionnel pour s'accaparer le marché européen.

4.1.3. Des nouvelles pratiques de semis et de rotations de cultures

De nombreux efforts ont été réalisés par les instituts de recherche présents dans la région, qu'ils soient privés (Fundação MT, Fundação Rio Verde) ou publics (Embrapa), brésiliens ou étrangers (CIRAD), pour améliorer les pratiques culturales dans les *cerrados*.

Parmi ces améliorations, le semis direct est certainement la plus convaincante. Cette pratique consiste à semer le soja sur les restes d'une culture précédente (maïs, mil, sorgho ou graminées) qui apportent alors plus de matière organique et d'azote minéral pour permettre à la plante de mieux se développer. De plus, ces résidus végétaux permettent de mieux conserver l'eau dans le sol et ainsi de limiter les risques liés au climat tout en limitant les problèmes de pollution des eaux. Ils permettent également de conserver la biodiversité du sol qui aide à réguler les invasions de maladies. Le producteur y gagne aussi économiquement

puisqu'il n'a plus besoin de travailler la terre et applique moins de pesticides. Selon la CONAB, 90% du soja à Sorriso est semé de cette manière en 2007-2008. A l'échelle du Centre-Ouest, ce taux serait de 77% sur la période 2003-2005, alors qu'il n'était que de 5% entre 1993 et 1995 (Smaling *et al.*, 2008). Ces chiffres prouvent l'importance prise par cette pratique dans la région. Cependant, celle-ci peut aussi être critiquée car, dans les faits, la plupart des producteurs réalisent un semis « semi-direct » ou semis minimum dans lequel la couverture secondaire n'est pas semée mais « lancée » et enterrée après un léger labour de la terre en surface.

En outre, le semis direct est basé sur l'idée de conserver une couverture végétale en permanence sur le sol. Il est donc nécessaire de semer une culture après la récolte du soja. Les combinaisons de succession soja-maïs, soja millet, soja-sorgho ou soja-graminées se sont développées. Cela a surtout permis la généralisation des systèmes de production en double cultures commerciales. Ainsi, la combinaison soja-maïs a explosé. L'IBGE recensait 975000 ha de maïs semé en deuxième récolte au Mato Grosso en 2007. L'adoption de cette pratique s'est effectuée dans le cadre du processus de diversification présenté auparavant. Parallèlement, la combinaison soja-coton s'est aussi développée. De la sorte, même si le fait de conserver des résidus végétaux sur le sol permet de limiter l'impact des intrants chimiques par culture, cette pratique a paradoxalement entraîné une hausse des intrants par hectare et donc une augmentation potentielle de la pollution.



Figure 1.30 : Différenciation du SGM et du soja conventionnel à Sorriso (Source : D. Arvor, 2007).

Après l'adoption massive des systèmes en double cultures pour profiter au mieux de la saison pluvieuse (octobre-avril), une autre nouvelle pratique intitulée « Intégration Culture-Elevage » essaie de rentabiliser au mieux l'espace disponible en le rendant productif tout au

long de l'année. Certains considèrent cette pratique comme un système de production à trois cultures. Alors que dans un schéma classique la terre est improductive en saison sèche, il s'agit ici de semer du maïs conjointement avec du pâturage (*bracchiaria*) une fois le soja récolté, en février-mars. Les deux plantes vont alors croître ensemble. Après la récolte du maïs, le pâturage reste seul dans la parcelle et peut accueillir du bétail de juin à septembre. En outre, le pâturage a été reconnu comme étant une bonne couverture pour réaliser le semis direct du soja lors de la récolte suivante.

Quelques changements s'observent donc dans les modes de production des agriculteurs Mato Grossense. Ces changements permettent une meilleure protection de l'environnement et sont le signe d'une forme d'intensification écologique. Cependant, ces méthodes ont surtout été largement adoptées car elles permettaient d'améliorer la rentabilité de la production à l'échelle de l'exploitation agricole (diversification, double cultures...). Mais, il reste des enjeux environnementaux d'échelles régionales à régler tels que la déforestation ou la préservation des cours d'eaux. Répondre à ces enjeux est compliqué. Cela implique une participation plus citoyenne des producteurs car l'intensification écologique ne leur apporte pas de bénéfices directs. Des projets d'envergures régionales et locales menés notamment par des ONG et des administrations ont justement pour but de sensibilisé les producteurs à ces enjeux.

4.2. Le développement de projets de développement durable

Pour lutter contre la déforestation liée à l'avancée du front du soja, un moratoire du soja¹ a été instauré en 2006 entre des ONG, des producteurs et des entreprises privées. De nouvelles règles d'achat du soja par les multinationales exportatrices ont été mises en place. Elles consistent à ne plus acheter de soja cultivé sur des parcelles défrichées à partir de 2006 ou issu de fazendas ne respectant pas les droits du travail. Les règles mises en place dans le cadre de ce moratoire sont un exemple du poids que peut exercer la société civile et notamment les consommateurs, représentés par les multinationales exportatrices et les ONG, pour inciter les producteurs à adopter de nouvelles pratiques. De son côté, l'Etat accompagne ce projet en développant le programme Mato Grosso Legal² qui doit inciter les producteurs à récupérer leur passif environnemental (berges déboisées...). Ces deux projets représentent un premier élément de réponse à la question concernant la désignation du payeur pour la protection des services écosystémiques. Dans ce nouveau système, le producteur investit dans la protection environnementale afin de rester compétitif sur le marché soutenu par les consommateurs. Le contrôle est alors effectué par les multinationales. Ce nouveau modèle de préservation appliqué au marché du soja est perçu par Nepstad *et al.* (2006a) comme une conséquence positive de la mondialisation des marchés agricoles. Cette situation est donc paradoxale puisque c'est également la globalisation des marchés qui a favorisé la forte expansion des cultures de soja et donc la déforestation.

Le principal passif environnemental des fazendas mato-grossense aujourd'hui concerne les berges de cours d'eau déboisées : les aires de protection permanente (APP) (fig. 1.31). La récupération de ces forêts galeries est un enjeu capital pour la protection de la qualité de l'eau à travers la réduction de la dégradation des sols sur les pentes. Cependant, l'organisation du

¹ <http://www.greenpeace.org/international/press/releases/extension-amazon-soya-moratorium>

² http://www.al.mt.gov.br/V2008/ViewConteudo.asp?no_codigo=19638. Le programme est MT legal est un « Programa de Regularização Ambiental e Agrária nos Municípios do Estado de Mato Grosso ». Voir aussi la revue "Globo Rural" de février 2008 qui présente le projet Lucas do Rio Verde Legal qui est à l'origine du projet MT Legal.

reboisement des berges n'a de sens qu'à l'échelle communale ou à l'échelle du bassin versant. Des projets plus locaux sont donc menés pour répondre à cet enjeu.

Le projet le plus avancé est certainement celui mené par l'ONG ISA (Institut Socio-Environnemental) dans le cadre de la campagne Y Ikatu Xingu¹. Ce projet a pour but de récupérer les forêts galeries dans le bassin versant du fleuve Xingu dont les sources naissent dans des régions agricoles. C'est le premier projet qui a su convaincre les grands producteurs de soja de participer à la préservation environnementale. De telles opérations sont également menées à des échelles communales à Lucas do Rio Verde et Sorriso.

Dans cette dernière commune, les actions sont réalisées dans le cadre d'un projet dénommé Sorriso Vivo et mené par l'association «Clube dos Amigos da Terra» (CAT). Le projet essaie d'inciter les producteurs à récupérer ces APP dégradées (APPD) en replantant des espèces natives afin de respecter les lois. A Sorriso, la superficie totale des APPD a été estimée à 4900 ha. En 2006 et 2007, lors des deux premières années du projet, plus de 350 ha ont été replantés dans une vingtaine d'exploitations différentes avec plus de 80 espèces différentes de la région. L'objectif visé est bien sûr d'essayer de récupérer les 4900 ha de APPD. Ce projet joue en outre un rôle socio-économique positif puisqu'il permet de faire vivre une petite société locale qui travaille avec des employés recrutés dans les « assentamentos » voisins.

Plus généralement, le projet Sorriso Vivo, qui a la particularité d'être mené par un grand producteur local, a été créé dans l'optique de changer la réputation de Sorriso nationalement connu comme le plus gros producteur de soja afin d'en faire un symbole d'agriculture raisonnée. L'objectif est donc d'accompagner les producteurs dans un processus d'amélioration des pratiques culturelles pour permettre à la commune de conserver son rôle moteur dans l'agriculture régionale et ainsi de poursuivre son développement socio-économique. Le projet mise donc une partie de ses efforts vers l'éducation environnementale.

D'une part, l'éducation s'oriente vers les producteurs à travers l'organisation régulière de conférences présentées par des chercheurs d'instituts publics (Embrapa) ou privés (Fundação MT...) qui sont réalisées sur le terrain et auxquelles sont conviés les *sojiculteurs*. Le but de ces conférences est de sensibiliser les producteurs aux nouvelles pratiques culturelles. De plus, une association participant également au projet se charge d'inciter les exploitants à récupérer les emballages des produits phytosanitaires employés afin d'être recyclés. En effet, de nombreuses personnes avaient pris l'habitude de laver ces produits eux-mêmes, relâchant ainsi plus de produits chimiques dans les sols et les eaux, avant de les brûler sur place.

D'autre part, outre la sensibilisation des producteurs, les dirigeants du projet souhaitent aussi éduquer la société avec l'appui des pouvoirs publics locaux. Les enfants sont notamment ciblés car ils représentent l'avenir de la commune (fig. 1.32). Le territoire agricole de Sorriso ayant à présent atteint le stade de consolidation, les conditions semblent réunies pour limiter l'immigration des classes les plus jeunes. Ainsi, selon des enquêtes de terrain réalisées auprès de 57 personnes du secteur agricole, 47 (82%) déclarent souhaiter que leurs enfants restent à Sorriso dans l'avenir. Par ailleurs, dans cette commune entièrement tournée vers l'agriculture, les enfants sont souvent issus de familles agricoles et ils représentent donc un moyen de sensibiliser indirectement les producteurs. Dès lors, des accords ont été passés avec les représentants locaux du système éducatif (écoles et secrétariat municipal à

¹ <http://www.yikatuxingu.org.br/>

l'éducation) afin d'organiser des visites scolaires avec des professionnels (professeurs, agronomes...) dans une exploitation « vitrine ». Entre avril et novembre 2006, plus de 4000 élèves de Sorriso ont ainsi été amenés à découvrir le projet Sorriso Vivo. L'objectif est, d'une part, de leur présenter l'intérêt de reboiser les APPD et les essences d'arbres privilégiées et, d'autre part, de les informer sur les nouvelles pratiques culturales adoptées en expliquant leur intérêt pour la protection des sols et des eaux. Enfin, un accord de coopération technique a été signé avec la faculté locale afin d'intégrer les étudiants au projet. Ceux-ci participent à l'organisation de conférences ou aux visites de terrain.

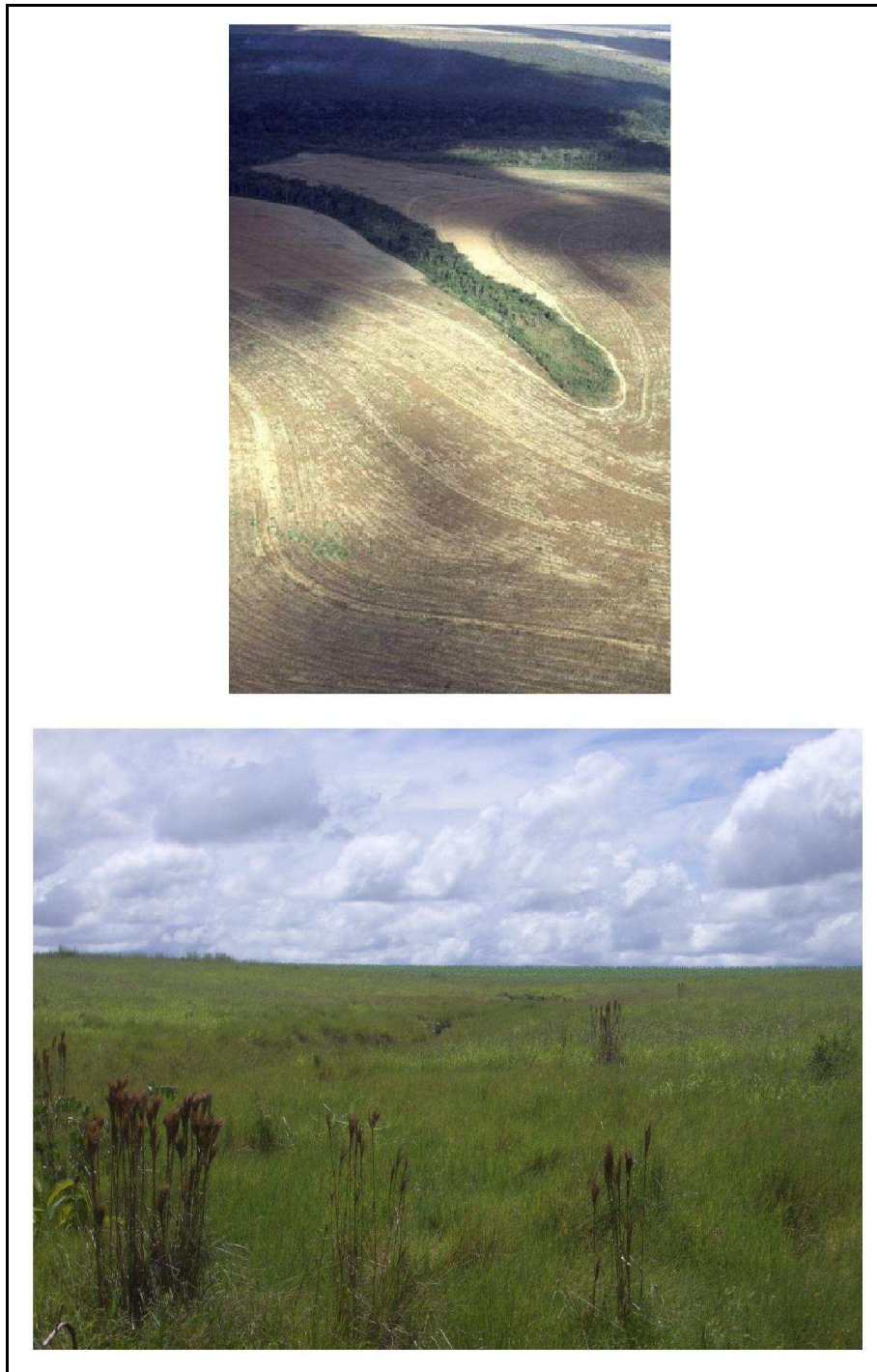


Figure 1.31 : Photos d'Aire de Protection Permanente (en haut) préservée (Source : V. Dubreuil, 1999) et (en bas) dégradée à Sorriso (Source : D. Arvor, 2007).



Figure 1.32 : Sensibilisation des enfants des écoles de Sorriso aux problèmes de conservation de la qualité des sols et de l'eau (Source : D. Arvor, 2008).

5. Conclusion

Les dynamiques territoriales, analysées à travers l'exemple du soja dans le Mato Grosso, et en particulier dans le municipe de Sorriso, illustrent le passage d'un front pionnier amazonien. Après une première étape d'occupation basée sur l'élevage extensif, la colonisation menée dans le cadre de projets privés a permis d'installer une agriculture moderne du riz s'étendant sur des espaces écologiques jusqu'alors peu exploités. A cette même époque, des projets de colonisation publique apparaissent, accentuant la ségrégation sociale qui s'instaure sur le territoire. La troisième étape est celle de l'intégration territoriale par le soja en tant que moteur de développement et de structuration des activités liées aux agro-industries, y compris la création de nouveaux centres urbains. Elle correspond à l'arrivée d'un front économique qui progresse et se rétracte notamment en fonction des cours du soja, comme le prouvent les baisses des superficies semées en soja en 2006 et 2007. Enfin, la dernière étape, qui semble commencer désormais, est celle de la concertation ou de la régulation nécessaire du modèle productif dont la fragilité et les limites ont été mises en lumière par la crise de l'agro-business, notamment dans le complexe soja. Cette étape doit permettre de maintenir les niveaux de production tout en limitant l'impact sur l'environnement. Certains producteurs s'orientent donc vers une forme d'agriculture de conservation. De plus, ils essaient de mieux protéger les espaces naturels (réserves égales, APP) et même de reboiser si nécessaire, ce qui caractérise la dernière étape du front pionnier tel qu'il est présenté par DeFries *et al.* (2004) (cf chapitre 2).

Les témoins de la crise des « territoires du soja » du Mato Grosso, à travers l'exemple de Sorriso sont multiples : dégradation environnementale (déforestation, érosion, pollution,

etc...), tensions sociales liées à l'inégal accès à la terre, problèmes économiques liés à la baisse des cours du soja et difficultés financières des producteurs (endettement) ont clairement montré les limites du « modèle matogrossense » de développement. Cependant, la région reste attractive, avec un niveau de vie moyen élevé et des infrastructures urbaines d'un bon niveau : en 2000, Sorriso avait le plus fort IDH du Mato Grosso (Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil¹). La durabilité du système en place repose finalement moins sur le soja lui-même que sur l'adaptabilité dont semblent faire preuve les producteurs. Les initiatives relevées chez beaucoup d'entre eux montrent leur opportunisme quant au choix des cultures et des méthodes pratiquées. Mais intensification culture-élevage, diversification, reconquête des terres dégradées relèvent aussi d'un « projet de territoire ». La prise en compte de facteurs environnementaux, quoique encore très timide, montre le souci de donner une dimension « durable » aux choix socio-économiques : autant de signes d'un dynamisme et d'un opportunisme propres à ces nouveaux territoires et à leurs acteurs.

Néanmoins, il est prudent de relativiser l'importance du virage qu'est en train de prendre la filière du soja au Mato Grosso. L'adoption de nouvelles pratiques dépend encore largement de leur intérêt économique à court terme. Le développement économique reste le principal objectif des producteurs et les quelques actions environnementales engagées servent souvent de façade. Ainsi, un sojiculteur de Sorriso, participant du projet SorrisoVivo et pratiquant les pratiques agricoles recommandées, a été accusé en 2007 de déboisement à l'intérieur de la réserve indigène du Xingu.

¹ <http://www.pnud.org.br/home/>

Synthèse de la Partie 1

Cette première partie a permis de présenter le contexte de cette thèse en replaçant la dynamique du soja dans une perspective plus large d'étude de la dynamique pionnière au Mato Grosso. Deux facteurs essentiels à prendre en compte pour bien comprendre le mode d'occupation de l'Amazonie ont été mis en avant : (i) le rôle d'aménageur joué par l'Etat qui organise l'occupation de l'Amazonie depuis plus de 70 ans et (ii) la conjoncture économique qui agit comme un accélérateur ou un frein au processus d'occupation de l'espace.

Ces deux facteurs sont les éléments moteurs du front pionnier menant à la formation de nouveaux territoires en Amazonie. Au Mato Grosso, la culture du soja constitue la principale activité économique du front et toutes les infrastructures créées visent à améliorer sa rentabilité. Ainsi, à l'instar des cycles économiques successifs de la canne à sucre, de l'or, du caoutchouc ou du café qui ont marqué l'histoire nationale, le soja est un élément central du processus d'émergence des territoires au Mato Grosso. On peut donc parler de cycle du soja au Mato Grosso.

Ce cycle est animé par l'arrivée de colons d'origines diverses et aux objectifs variés (petits producteurs ou ouvriers du Nordeste, producteurs capitalisés du Sud...) qui rentrent en compétition avec les populations indigènes et traditionnelles pour l'appropriation d'un territoire. Chacune de ces classes sociales cohabite avec les autres et une certaine organisation spatiotemporelle des territoires s'instaure. Celle-ci caractérise la dynamique du front pionnier qui se compose de trois espaces : l'avant-front, la frange pionnière et l'arrière front. Au sein de la frange pionnière, la filière agricole est la principale animatrice de l'avancée du front pionnier. Elle participe à la mise en place d'une frontière agricole qui progresse selon trois fronts successifs : front d'ouverture, front économique et front d'intensification. Le front d'ouverture correspond à l'arrivée des populations dans un espace encore vierge afin de pratiquer une agriculture souvent traditionnelle. Le front économique intervient lorsque s'instaure une certaine spécialisation d'un territoire vers une activité économique porteuse. Ce front s'accompagne d'une différenciation entre classes sociales avec une population tirant profit de cette spécialisation et une autre se trouvant en situation d'échec. Enfin, la phase d'intensification agricole constitue la dernière étape de l'avancée du front pionnier. Au cours de la « Révolution Verte », l'intensification agricole s'est appuyée sur la mécanisation et l'augmentation des intrants. Aujourd'hui, l'intensification écologique prend localement le relais et a pour but de continuer à améliorer la productivité tout en réduisant les impacts environnementaux.

Cette nécessité de mieux prendre en compte l'environnement dans le modèle de développement résulte de la prise de conscience par la communauté internationale des impacts de la déforestation sur la biodiversité et sur le climat. Ce changement de perspective intervenu dans les années 1990-2000 marque le début d'une nouvelle ère de colonisation en Amazonie que l'évolution des territoires du soja au Mato Grosso illustre parfaitement.

Après l'arrivée des premiers colons dans les années 1970 afin de pratiquer l'élevage ou la culture du riz (front d'ouverture), les producteurs de soja ont acquis de nouvelles terres dans les années 1980-1990 en profitant de la conjoncture économique favorable (front économique). Cette arrivée s'est traduite par une forte expansion des surfaces cultivées liée à des forts taux de déforestation. Aujourd'hui, dans les principales communes de production de

soja (Sorriso par exemple), toutes les terres arables sont déjà exploitées. Les producteurs intensifient donc leurs pratiques pour augmenter leur rentabilité (front d'intensification).

L'intensification agricole au Mato Grosso consiste surtout à semer deux cultures en succession au cours d'une même saison pluvieuse. Même si l'adoption d'une telle pratique est critiquable (pollution des eaux et des sols), elle traduit aussi un signe d'intensification écologique. Elle permet effectivement de diversifier la production et de protéger les sols toute l'année. De plus, certains producteurs commencent à reboiser les berges de cours d'eau afin de se mettre aux normes vis-à-vis des lois environnementales.

Avec la progression d'un front pionnier, les paysages du Mato Grosso sont en pleine mutation. Il est à présent nécessaire de cartographier et quantifier ces changements afin d'analyser comment les sociétés interagissent avec leur environnement. A ces fins, la télédétection offre de nombreuses perspectives.



Sorriso (2007) : « BR-163, le salut de la culture du soja ». L'asphaltage de la route BR-163 reliant Cuiaba à Santarem est souhaité par les producteurs car elle permettrait de réduire les coûts de production. Il est par contre redouté par les environnementalistes qui craignent une augmentation de la déforestation. © DA-2009

Partie 2 : Apport de la télédétection à moyenne résolution pour le suivi de la dynamique spatiotemporelle du soja

Introduction de la Partie 2

Chapitre 5. Les études d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie

Chapitre 6. Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation

Chapitre 7. Application de la méthodologie pour la cartographie des surfaces agricoles au Mato Grosso

Synthèse de la Partie 2

Introduction de la Partie 2

Le processus de colonisation de l'Amazonie entamé au 20^{ème} siècle a eu de nombreuses conséquences sur l'environnement. L'avancée du front pionnier se caractérise ainsi par des taux de déforestation élevés. De plus, l'expansion des cultures mécanisées de soja accroît la pollution des sols et des eaux. Il est donc devenu essentiel aujourd'hui d'effectuer un suivi spatiotemporel de ces activités. La télédétection représente un outil idéal pour réaliser ce type de suivi, que ce soit à long ou moyen terme et à petite ou grande échelle. L'objectif de cette partie est de présenter l'intérêt des images satellitaires pour les analyses de changements d'occupation et d'utilisation du sol au Mato Grosso.

Dans le premier chapitre, nous proposons une synthèse bibliographique sur l'apport des techniques de télédétection pour le suivi des changements d'occupation et d'utilisation du sol. L'étude se concentre, d'une part, sur le suivi des couverts forestiers et de la déforestation et, d'autre part, sur le suivi de l'évolution des surfaces agricoles et des pratiques agricoles. Par ailleurs, nous présentons les principes généraux de télédétection permettant le suivi de la végétation. Enfin, alors que les premiers travaux de télédétection s'appuyaient sur l'utilisation de données non optimales pour les études d'échelle régionale (haute résolution temporelle et faible résolution spatiale pour les données NOAA-AVHR et faible résolution temporelle et haute résolution spatiale pour les données Landsat ; Wessels *et al.*, 2004), nous expliquons pourquoi les données à moyenne résolution issues du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sont actuellement les plus adaptées pour le suivi des changements d'occupation et d'utilisation du sol à l'échelle du Mato Grosso.

Le deuxième chapitre vise à présenter de manière plus approfondie la méthodologie appliquée pour le suivi de ces changements. Cette méthode s'appuie sur des classifications de séries multi-temporelles d'indices de végétation. La classification est présentée comme un processus complexe divisé en six étapes successives.

Enfin, le troisième chapitre présente les résultats obtenus suite à l'application de cette méthodologie sur la zone d'étude matogrossense. En fait, deux classifications successives sont réalisées à partir de cette méthodologie. La première classification a pour but de cartographier les surfaces agricoles tandis que l'objectif de la deuxième classification est de discriminer les cultures semées et les pratiques culturales. Ces classifications sont effectuées annuellement entre les récoltes des années 2000-2001 et 2006-2007 afin de réaliser un suivi des changements d'occupation et d'utilisation du sol sur une période de sept récoltes suffisamment longue pour pouvoir ressortir des tendances dans les changements observés.

Chapitre 5. Les études d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie

1. Introduction

L'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol représente une part majeure des travaux réalisés à partir de la télédétection et plus généralement des systèmes d'information géographique. L'occupation du sol est définie selon les attributs biophysiques de la surface terrestre tandis que l'utilisation du sol fait référence à l'anthropisation de ces attributs et notamment à la fonction socio-économique qui lui est attribuée (Lambin *et al.*, 2001 ; Lecerf, 2008). Les changements d'occupation du sol sont : « *an alteration in the surface components of the vegetation cover* » (Coppin *et al.*, 2004). Ces changements peuvent être d'origine anthropique ou naturelle (Coppin *et al.*, 2004). Deux formes de changements d'occupation et d'utilisation du sol se distinguent (Foody, 2002 ; Coppin *et al.*, 2004):

- les **conversions** (changement d'une classe d'occupation ou d'utilisation du sol vers une autre classe) ;
- les **modifications** (changement intra-classe).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à une forme de conversion d'occupation du sol (la déforestation) et une forme de modification d'utilisation du sol (l'intensification agricole).

Les thématiques considérées dans les études de changement d'utilisation du sol sont diverses : modifications de la répartition des couverts végétaux naturels, intensification agricole, urbanisation, déforestation tropicale (Lambin *et al.*, 2001). Ces études permettent d'apporter des éléments de réponse à des problématiques économiques, administratives, urbaines ou environnementales (Jonathan, 2005). Elles intéressent donc différents acteurs (politiques, économistes, scientifiques, producteurs, associations...) (Allen *et al.*, 2002) car elles représentent une aide à la décision utile à des échelles spatiales (du local au global) et temporelles (du court terme au long terme) variées.

Dans un premier temps, ce chapitre présente comment les images satellites ont été utilisées pour l'étude des conversions d'occupation du sol et des modifications d'utilisation du sol. Nous présentons, d'une part, les travaux effectués pour la cartographie des couverts végétaux et l'étude de la déforestation et, d'autre part, les recherches menées pour la détection des surfaces cultivées et les changements de pratiques culturelles. Ces analyses sont ensuite mises en rapport pour déterminer comment les données satellites intégrées dans des systèmes d'information géographiques permettent d'expliquer les changements observés.

Après avoir démontré l'utilité de la télédétection pour l'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol, les principes fondamentaux de la télédétection sont résumés en mettant l'accent sur leurs apports pour l'étude de la végétation. Enfin, les données MODIS employées dans cette thèse sont introduites pour présenter leur intérêt particulier pour la détection des changements dans les couverts végétaux à l'échelle régionale, et surtout au Mato Grosso.

2. L'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol

La détection des changements d'occupation et d'utilisation du sol n'est qu'une étape nécessaire menant à l'explication et l'évaluation des conséquences de ces changements. Une analyse complète ne doit donc pas simplement se baser sur des cartes d'occupation et d'utilisation du sol. Elle doit intégrer une dimension pluridisciplinaire à travers l'utilisation de variables économiques, sociales et environnementales (Geist et Lambin, 2001). La télédétection ne doit donc être perçue que comme un outil participant à une analyse transversale des phénomènes observés.

Selon Brown *et al.* (2007), les analyses de changements d'occupation et d'utilisation du sol sont basées sur trois axes :

1. La cartographie et le suivi des changements aux échelles locales, régionales ou globales.
2. Des analyses intégrées mettant en relation les techniques de télédétection et les sciences sociales, économiques et géographiques.
3. La modélisation spatiotemporelle des changements.

Les deux premiers axes de recherche proposés par Brown *et al.* (2007) sont repris dans ce chapitre pour l'étude des changements particuliers que sont la déforestation et l'intensification agricole. Une attention particulière est portée sur les modalités d'intégration des techniques de télédétection pour l'étude de ces changements. La modélisation des changements, en revanche, n'est pas prise en considération dans cette thèse¹.

2.1. Apport de la télédétection pour la cartographie des changements d'occupation et d'utilisation du sol

Depuis plus de 30 ans, les données satellites permettent de réaliser des cartes de changements d'occupation et d'utilisation du sol à différentes résolutions spatiales et temporelles. La variabilité des sources disponibles offre des perspectives différentes selon les échelles considérées et les objectifs fixés. « *A mapping exercise is always a compromise between the desirable (most suitable information output) and the achievable (availability of raw data and the feasibility of the information processing). The classification system and the output scale have to balance the study objectives, the area covered and the source of information* » (Achard *et al.*, 2001). Il existe trois approches pour détecter les changements d'occupation du sol par télédétection (Mas, 1999) : (i) l'amélioration d'images, i.e. la combinaison mathématique d'images de dates différentes ; (ii) les classifications de données multi-dates et (iii) les comparaisons de classifications indépendantes. La dernière approche est la plus instinctive et la plus employée. C'est également celle qui donne les meilleurs résultats (Mas, 1999). Elle sera donc privilégiée dans cette thèse.

2.1.1. La cartographie des couverts végétaux et de la déforestation

2.1.1.1. La cartographie des couverts végétaux

¹ Pour plus d'information sur ce sujet, lire Soares-Filho *et al.* (2001) et Nédélec (2005)

En milieu rural, les études d'occupation du sol ont surtout pour objectif de cartographier les couverts végétaux. A l'échelle globale, le suivi de ces couverts a été établi dans le cadre de programmes internationaux tels que GLC2000 (Global Land Cover) mené par 30 organismes de recherche coordonnés par le JRC (Bartholomé et Belward, 2005), UMD (Université du Maryland) (Hansen et Reed, 2000), IGBP-DISCOVER¹ (International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information System) réalisé par l'USGS (U.S. Geological Survey) sous l'égide du ICSU (International Council for Scientific Unions) (Loveland *et al.*, 2000). Parmi les différents biomes du globe, les forêts tropicales humides attirent l'attention de nombreux chercheurs car les changements démographiques, sociaux et économiques qui s'y produisent exercent une pression continue sur le couvert forestier (Achard *et al.*, 2002). Des projets de recherche spéciaux leur ont été consacrés tels que le programme TREES (Tropical Ecosystem Environment observation by Satellite) mené par le JRC (Joint Research Center) (Achard *et al.*, 2001; Achard *et al.*, 2002), ou le programme FRA (Global Forest Resource Assessment) mené par la FAO (Food and Agriculture Organization) (FAO, 2007).

Ces programmes s'appuient principalement sur les techniques de télédétection à partir de données satellitaires basses résolutions NOAA-AVHRR et SPOT 4-VEGETATION². Ces données ont des résolutions spatiales (1 km) et temporelles (1 jour) comparables mais SPOT4-VEGETATION présente une meilleure résolution spectrale avec une bande MIR permettant d'étudier le taux d'eau contenu dans la végétation (Mayaux *et al.*, 2000). Cependant, les images AVHRR sont plus couramment utilisées car elles présentent des séries de données plus longues, le capteur AVHRR ayant été mis en service plus tôt (1978) que le capteur VEGETATION (1998) (tableau 2.1).

Les mêmes données basse résolution ont été employées pour la cartographie de la végétation à l'échelle continentale ou régionale. Eva *et al.* (2004) ont cartographié l'occupation du sol en Amérique du Sud. Au Brésil, Gurgel et Ferreira (2003) sont parvenus à détecter les cinq grands biomes brésiliens à partir d'images NOAA-AVHRR : forêt amazonienne, cerrado, caatinga, forêt atlantique et forêt de conifères. Des études plus fines ont aussi été menées pour différencier les types de cerrado (Ferreira et Huete, 2004) et de forêt amazonienne (Durieux *et al.*, 2001). Cette thématique a été reprise par Carreiras *et al.* (2006a) qui ont cartographié les forêts primaires et secondaires ainsi que le cerrado en 2000 à partir de données SPOT4-VEGETATION. A l'échelle du Mato Grosso, Dubreuil *et al.* (2002) puis Carreiras *et al.* (2006b) ont respectivement ciblé leurs efforts sur la mise en avant des grands ensembles géographiques à partir de données NOAA-AVHRR et SPOT-VEGETATION respectivement.

L'intérêt majeur des données à basse résolution spatiale réside dans leur haute résolution temporelle. Avec plusieurs passages quotidiens, il est possible de suivre la dynamique phénologique des couverts végétaux. Pour profiter de cette capacité, de nombreux travaux de détection des couverts se sont orientés vers la classification de données multi-temporelles (Justice *et al.*, 1985 ; Townshend et Justice, 1986). Cependant, la basse résolution spatiale rend des résultats mitigés avec d'importantes erreurs de classification (Friedl *et al.*, 2002 ; Carreiras *et al.*, 2006a). Ces erreurs sont le fait d'un problème d'échelle couramment rencontré en géographie et notamment dans les études de télédétection : le MAUP

¹ <http://www.igbp.kva.se/>

² Le prochain programme de la FAO (FRA2010) prévoit toutefois d'intégrer des données hautes résolutions Landsat et moyenne résolution MODIS (Ridder, 2007).

(Modifiable Areal Unit Problem)¹ (Jelinski et Wu, 1996). Les données hautes résolutions ont donc également été considérées pour réaliser les cartes de végétation.

Programme	Organisme	Date de lancement du projet	Echelle d'étude	Capteur
IGBP-DISCover	ICSU-USGS	1987	globale	NOAA-AVHRR
UMd	Université du Maryland	-	globale	NOAA-AVHRR
TREES	Joint Research Center and European Space Agency	1991	Pan-tropicale	NOAA-AVHRR
FRA	Food and Agriculture Organization	1946 (la télédétection n'est employée que depuis 1990)	Pan-tropicale (mais globale à partir de 2010)	NOAA-AVHRR
GLC2000	Joint Research Center	2000	globale	SPOT4-VEGETATION
MODIS Land Cover Product	Université de Boston	2000	globale	TERRA-MODIS

Tableau 2.1 : Principaux programmes de cartographie de l'occupation du sol et les capteurs employés (d'après Mayaux *et al.*, 2005)

La première cartographie à échelle fine (1 : 2500000) de la couverture végétale par télédétection au Brésil a été réalisée à travers la mise en place du projet Radambrasil (1970)². L'objectif de ce projet était de représenter spatialement les classes physiologiques de végétation du territoire national ainsi que d'autres aspects du milieu naturel tels que la géomorphologie, la géologie et le sol (Ponzoni et Shimabukuro, 2007). Les données ont été acquises à partir d'un radar aéroporté. Par la suite, ce travail initial a été complété en intégrant les données satellitaires haute résolution. Ces données sont intéressantes pour distinguer des couverts hétérogènes caractérisant la forêt dense humide (Foody et Hill, 1996 ; Salovaara *et al.*, 2005) et détecter les forêts secondaires (Ponzoni *et al.*, 2002 ; Lu *et al.*, 2003 ; Jepson, 2005). Les premiers satellites utilisés sont de la série Landsat (30 m). Les images fournies depuis 1999 par les satellites sino-brésiliens de la série CBERS (20 m) représentent une source d'information ayant l'avantage non négligeable d'être gratuites (les données Landsat sont également mises à disposition gratuitement depuis mars 2008 sur le site de l'INPE).

Les données basses et hautes résolutions présentent donc chacune leurs avantages pour le suivi des couverts végétaux : la résolution temporelle pour les données basse résolution et la résolution spatiale pour les données haute résolution. Ces deux sources d'information complémentaires sont donc régulièrement employées conjointement, l'emploi de la haute

¹ Le MAUP est caractérisé par deux composantes : le problème d'échelle (la variation des résultats obtenus quand une surface donnée est analysée par des pixels de plus en plus grands) et le problème de zonage (la variation des résultats obtenus quand un espace est découpé en zones de même taille mais de formes différentes)

² http://daac.ornl.gov/data/bluangel_harvest/MJG_V1/pre_LBA_CDROM/radam/radam0.html

résolution servant surtout à la validation des classifications effectuées avec les données basse résolution (Justice *et al.*, 2000 ; Mayaux *et al.*, 2005).

Les données moyennes résolution telles que celles proposées par MODIS représentent une alternative intéressante pour combiner une haute résolution temporelle (1 jour) avec une résolution spatiale (250 m) plus fine. Après avoir validé la concordance des données MODIS avec les données NOAA-AVHRR et SPOT-VEGETATION (Morissette *et al.*, 2004), les techniques de télédétection jusque là appliquées aux données basses résolution ont été adaptées aux données moyenne résolution pour créer des cartes à échelle globale (Friedl *et al.*, 2002) ou régionale (Wessels *et al.*, 2004 ; Hung et Yoshifumi., 2005 ; Lunetta *et al.*, 2006 ; Knight *et al.*, 2006 ; See et Fritz, 2006 ; Lecerf , 2008). Ferreira *et al.* (2004) ont démontré l'apport des données MODIS pour la discrimination de trois types de cerrado. Au Mato Grosso, Anderson (2004) a réalisé une carte de l'occupation du sol en 2002 qui a ensuite été actualisée par Lima *et al.* (2007). A une échelle locale, Jonathan (2005) a cartographié l'utilisation du sol dans la région du Alto Taquari, au sud-est du Mato Grosso.

2.1.1.2. Détection des changements d'occupation du sol : le suivi de la déforestation

Les techniques de cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol appliquées régulièrement dans le temps permettent la détection de changements (Lambin *et al.*, 2001). Dans les régions tropicales, l'étude de ces changements se concentre surtout sur le suivi de la déforestation. Achard *et al.* (2002) ont estimé les superficies défrichées annuellement dans les forêts tropicales du monde à partir de données NOAA-AVHR : leurs estimations de $5,8 \pm 1,4$ millions d'hectare de forêts déboisées par an entre 1990 et 1997 sont alarmantes mais restent inférieures à celles mesurées par la FAO ($8,6 \pm 1,3$ millions d'hectares entre 1990 et 2000).

A une échelle régionale, les images haute résolution sont privilégiées pour leur meilleure précision. En Amazonie brésilienne notamment, le TRFIC (Tropical Rain Forest Information Center) de l'Université du Michigan¹ a été le premier, dès les années 1970, à utiliser les données Landsat pour repérer les parcelles défrichées. La bonne qualité des résultats (+/- 3% d'erreur) est dévalorisée par la lenteur du processus de détection lié à la faible répétitivité des images Landsat et surtout au nombre de scènes nécessaires pour couvrir le bassin Amazonien. Ainsi, des résultats n'ont été produits au Mato Grosso que pour quatre années : 1975, 1986, 1992, et 1996¹.

A la fin des années 1970, l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) a également mis en place un suivi de la déforestation par télédétection (Shimabukuro *et al.*, 2005 ; Hansen *et al.*, 2008). Deux estimations de la déforestation ont été faites à partir des images Landsat 2-MSS pour les périodes 1973-1975 et 1975-1978 (Hansen *et al.*, 2008). Mais ce n'est qu'avec le lancement du projet PRODES (Programa de Calculo do Desflorestamento na Amazonia) en 1988 que ce suivi a été réalisé annuellement. Ce projet, toujours en cours aujourd'hui, permet un suivi précis des déboisements à partir de données hautes résolutions fournies par les capteurs Landsat TM et ETM+. Le projet a été mené de 1988 à la fin des années 1990 à partir d'analyses visuelles réalisées par des experts. Depuis 1997, le processus a été progressivement automatisé selon la méthode proposée par Shimabukuro *et al.* (1998). Les résultats publiés annuellement depuis 2003 fournissent des estimations fiables de la déforestation à l'échelle du bassin Amazonien. Ainsi, les 267 716 km² de forêt défrichés entre 1992 et 2005 (soit un taux annuel de 18311 km²) ont permis de quantifier et de spatialiser le

¹ <http://www.trfic.msu.edu/>

phénomène (INPE). L'état du Mato Grosso a alors été reconnu comme étant une zone particulièrement concernée par le problème. Près de 40% de la déforestation en Amazonie s'y est concentrée sur cette période 1992-2005, soit 104076 km²¹. Toutefois, si les données PRODES sont les plus fiables pour le suivi de la déforestation, quelques réserves ont été émises quant à son utilisation :

- son délai de mise à disposition est long. Il faut en effet analyser toutes les scènes couvrant l'Amazonie brésilienne (plus de 220 scènes) car une méthode statistique basée sur l'extrapolation à partir de scènes tests n'est pas fiable (Tucker et Townshend, 2000). Ainsi, les estimations réalisées à partir des images Landsat des mois de juin, juillet et septembre ne sont publiés qu'au début de l'année suivante (Hansen *et al.*, 2008) ;

- les estimations de déforestation du cerrado des forêts secondaires ne sont pas prises en compte (Carreiras *et al.*, 2006a ; Hansen *et al.*, 2008).

Le lancement du spectroradiomètre MODIS sur la plateforme TERRA en 1999 a ouvert de nouvelles perspectives pour le suivi de la déforestation. Morton *et al.* (2005) ont validé la qualité de ces données pour compléter les informations issues des données PRODES. La haute résolution temporelle (un à deux jours) des données MODIS couplée d'une résolution spatiale moyenne (250 m) en fait un outil efficace pour la détection en temps réel des plus grands déboisements. En effet, Townshend et Justice (1988) affirment qu'une résolution spatiale inférieure à 1 km est fortement souhaitable pour détecter les changements d'occupation du sol. Ils ont alors recommandé d'installer un capteur d'une résolution de 500 m pour le projet MODIS avec une ou deux bandes de résolution plus fine pour aider à la calibration des données multi-temporelles. Ponzoni *et al.* (2002) ont par la suite critiqué ces affirmations en estimant qu'une résolution spatiale supérieure à 200 m cause une surestimation de la superficie forestière en Amazonie due à la présence d'un grand nombre de pixels mixtes².

Le projet DETER (Detecção de áreas desflorestadas em tempo real) mené par l'INPE et qui s'insère dans le cadre du projet PRODES s'appuie sur les atouts temporels proposés par le capteur MODIS (Shimabukuro *et al.*, 2005). Ce programme est complémentaire du projet PRODES et a pour objectif de permettre l'intervention rapide sur le terrain d'organismes gouvernementaux (IBAMA) pour contrôler la légalité des ouvertures de forêt effectuées. La méthode employée s'apparente à celle du projet PRODES mais son application aux données quotidiennes MODIS fournit des estimations de superficies déboisées tous les 15 jours. C'est cette résolution plus fine qui permet un suivi en temps réel des déboisements et donc un meilleur contrôle de la part de l'IBAMA. Parallèlement au programme DETER de l'INPE, l'organisation non-gouvernementale IMAZON a créé un Système d'Alerte au Déboisement (SAD) (Souza Jr *et al.*, 2008) qui produit des cartes de déforestation mensuelles à partir de données MODIS au Mato Grosso depuis août 2006 et au Para depuis août 2007. Ces deux estimations en temps réel (DETER et SAD) ont pour but de réduire au maximum le délai de détection de la déforestation.

Cependant, les estimations obtenues ne sont pas totalement satisfaisantes. En mai 2008, les résultats issus du projet DETER ont été fortement critiqués par la SEMA-MT (Secrétariat de l'Environnement du Mato Grosso) qui estimait que 90% des détections de parcelles

¹ http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2007.htm

² Les pixels mixtes sont des pixels incorporant différentes classes d'occupation du sol. La proportion du nombre de pixels mixtes est liée à la région d'étude et à la résolution spatiale des images.

récemment défrichées par le projet DETER étaient erronées. En réponse, l'INPE a proposé de travailler à l'étude d'améliorations à apporter à la méthodologie¹. Hansen *et al.* (2008) ont donc décidé de travailler à la mise en place d'une méthodologie intermédiaire permettant d'estimer les superficies défrichées à partir de séries temporelles mensuelles MODIS à 500 m. Leur but est de fournir des premières estimations fiables dès la fin de la saison sèche (septembre), soit près de six mois avant la publication des données PRODES. La méthodologie présente aussi l'avantage de pouvoir évaluer la déforestation du cerrado et des forêts secondaires (Hansen *et al.*, 2008).

Enfin, la SEMA-MT (*Secretaria Estadual de Meio Ambiente de Mato Grosso*) effectue un suivi de la déforestation réalisé à partir d'images Landsat et CBERS. L'objectif de ces travaux s'inscrit dans un cadre administratif puisqu'il s'agit de différencier les déboisements autorisés des déboisements illégaux. En effet, c'est la SEMA qui accorde les autorisations de déforestation au Mato Grosso et doit donc se charger de leur contrôle. Ce suivi est effectué depuis 1992 par des experts qui détectent les parcelles défrichées visuellement. Cette méthode non automatisée souffre d'hétérogénéité spatiale (toutes les scènes ne sont pas étudiées par les mêmes experts) et temporelle (toutes les années n'ont pas été cartographiées). Elle a cependant l'avantage de mieux détecter la déforestation dans le cerrado et les forêts dégradées (les méthodes automatisées ne détectent que les parcelles totalement défrichées).

Il existe donc différentes sources de cartes de déforestation en Amazonie mais aucune n'est idéale. Cela a incité plusieurs auteurs à réaliser leurs propres cartes de déforestation afin de répondre à des thématiques précises. De nombreuses études (Fearnside et Guimarães, 1996 ; Cardille et Foley, 2003 ; Lucas *et al.*, 2002 ; Morton *et al.*, 2005 ; Jepson, 2005 ; Hansen *et al.*, 2008) regrettent par exemple que les estimations proposées ne prennent pas en compte le potentiel de résilience de la végétation naturelle. Ce type d'occupation du sol est très important car, alors que le déboisement participe à l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la végétation en régénération permet de capter du carbone (Fearnside et Guimarães, 1996 ; DeFries *et al.*, 2002 ; Shimabukuro *et al.*, 2005). En 1996, Fearnside et Guimarães (1996) estimaient que 48% des superficies défrichées en 1990 étaient en état de régénération. Ces chiffres se rapprochent des conclusions tirées par Cardille et Foley (2003) qui ont évalué à partir de données NOAA-AVHRR que 36% des forêts défrichées en Amazonie en 1980 avaient été reconquises par la végétation naturelle en 1995. Ces pourcentages représentent entre 90000 et 157973 km² (Carreiras *et al.*, 2006a). Dans le cerrado, les taux seraient plus importants puisque Jepson (2005) démontre à partir d'images Landsat du sud-est du Mato Grosso que 70% de la végétation naturelle a connu au moins une transformation sur la période 1986-1999 mais que seulement 20% auraient en fait été réellement convertis. Ainsi, 50% du cerrado transformé se serait en fait régénéré sur cette même période.

Outre le fait de ne pas considérer les forêts en régénération, les estimations de la déforestation ne prennent pas en compte les forêts dégradées. Dans leurs estimations réalisées à partir de données Landsat, Skole et Tucker (1993) prennent en compte la fragmentation (zones forestières inférieures à 100 km²) et les effets de bord (bande de 1 km de profondeur dans la forêt) car ces deux paramètres impactent fortement la biodiversité. Ces auteurs estiment alors que les superficies de forêt annuellement dégradées en Amazonie étaient de 38000 km² entre 1978 et 1988 alors que seulement 15000 km² auraient été réellement

¹ <http://www.agrosoft.org.br/?q=node/100818>

défrichés annuellement. Ces forêts dégradées, souvent localisées en bordures de parcelles exploitées, ont importantes à considérer car elles sont plus vulnérables aux feux que les forêts intactes : « *Fire frequency becomes a function of distance from deforested forest edges and fire severity increases with frequency* » (Cochrane, 2003). Ces auteurs critiquent d'ailleurs également les données de déforestation car elles ne distinguent pas les actes de déforestation intentionnels des feux accidentels ou naturels, lesquels peuvent alors entraîner des fortes hausses dans les estimations (+129% à Paragominas entre 1993 et 1995) et donc biaiser les conclusions tirées chiffres de la déforestation. Ce cas est surtout problématique lors des années El Niño qui correspondent à des années sèches en Amazonie (Cochrane *et al.*, 1999).

2.1.2. La cartographie des surfaces agricoles et des pratiques agricoles

2.1.2.1. La cartographie des surfaces agricoles

Les statistiques agricoles sont essentielles pour garantir un suivi efficace des cultures et des dynamiques d'utilisation du sol. L'information la plus importante à quantifier est la superficie cultivée qui est nécessaire aux estimations de production et aux analyses de changements d'utilisation du sol. Aux Etats-Unis, ces informations sont récoltées depuis les années 1840 par les services du USDA (United States Department of Agriculture) à travers des entretiens et l'application de méthodes statistiques (Houseman et Becker, 1967). Les techniques de télédétection (photographies aériennes puis images satellites) ont par la suite amélioré sensiblement la précision des statistiques agricoles. La détection des surfaces agricoles représente une des premières applications des techniques de télédétection. Dès 1975 et la mise à disposition des images Landsat MSS, les services du NASS (National Agricultural Statistics Service des Etats-Unis) ont cherché à cartographier les surfaces agricoles en Illinois (Allen *et al.*, 2002). Depuis 1978, les données satellitaires sont régulièrement utilisées dans les estimations des statistiques agricoles américaines (Allen *et al.*, 2002). Elles ont pour but de compléter (et non de remplacer) les données acquises lors des recensements sur le terrain. En effet, ceux-ci présentent des limites certaines (temps d'obtention des données, temps de publication des données, demande de nombreuses ressources humaines et financières). Au Brésil, les statistiques agricoles officielles de l'IBGE sont réalisées à partir d'entretiens avec des acteurs locaux (IBGE, 2002) qui incluent une certaine subjectivité des données et donc de fortes incertitudes. L'intégration de données satellitaires objectives et spatialement homogènes permet de réduire ces incertitudes. Pour le moment, la télédétection n'est pas encore efficacement intégrée dans les estimations même si des projets sont en cours pour étudier ses potentialités d'applications au Brésil¹.

L'amélioration apportée par les images satellites se fait de deux manières : une meilleure estimation des surfaces cultivées et la localisation des parcelles cultivées (Carfagna et Gallego, 2005).

L'estimation des surfaces agricoles peut se faire selon différentes approches (Gallego, 2006). La meilleure technique consiste à corriger les recensements à partir de coefficients issus de régressions linéaires entre des données de terrain et des classifications d'images satellites (Carfagna et Gallego, 2005). L'utilisation combinée des données satellitaires et des données de terrain est jugée intéressante lorsqu'elle permet une réduction des erreurs d'estimation de superficies équivalentes à ce qui aurait été obtenu en collectant 1,5 à 2 fois plus de données sur le terrain (Carfagna et Gallego, 2005). La limite de cette méthode réside

¹ notamment dans le cadre du projet GeoSafras mené par la CONAB (*Companhia Nacional de Abastecimento*). http://www.conab.gov.br/conabweb/geotecnologia/html_geosafra/geosafra.html

dans la nécessité de disposer de données de terrain fiables en grande quantité, ce qui n'est pas souvent possible (Gallego, 2006). Une autre approche consiste à utiliser les données satellitaires seules. Les surfaces sont calculées en comptant les pixels appartenant à chaque classe d'utilisation du sol (Gallego, 2006). Cette méthode présente des limites liées à la répétitivité des données, la précision de la résolution spatiale, les défauts des classificateurs utilisés, les frontières floues entre couverts... Ces limites insèrent un biais dans les estimations qui est dépendant des territoires étudiés. L'utilité des données satellitaires est plus importante dans les régions caractérisées par des grandes parcelles et une faible diversification (Gallego, 2006), ce qui est le cas au Mato Grosso.

Plus que l'estimation chiffrée des surfaces cultivées, le principal intérêt d'utiliser les techniques de télédétection pour le suivi agricole est de pouvoir déterminer la localisation des cultures (Carfagna, 2000). Ces informations permettent d'analyser la distribution spatiale des cultures et donc d'observer leurs dynamiques. Elles sont aussi nécessaires pour évaluer la variabilité spatiale des conditions de surfaces à travers l'étude de certaines variables comme le stress hydrique ou le rendement (Lobell et Asner, 2004).

Dans le cas où les données de terrain ne sont pas fiables voire inexistantes, les images satellites constituent donc une source de données efficace pour la détection des surfaces cultivées. Les données les plus précises et les plus couramment employées sont les données haute résolution des séries Landsat et SPOT (Carfagna et Gallego, 2005). Les données Landsat ont notamment été utilisées dès les années 1980 aux USA et en URSS dans le projet LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment ; Erickson, 1984). En Europe, les données SPOT-XS ont été intégrées dans les années 1990 dans le cadre du projet MARS (Monitoring Agriculture through Remote Sensing techniques ; Gallego, 1999).

Les données basse résolution ont surtout été employées pour repérer les surfaces cultivées à échelle régionale. Les données NOAA-AVHRR ont été les plus utilisées à ces fins sur tous les continents (Bastiaanssen et Ali, 2003 ; Rembold et Maselli, 2006 ; Jakubauskas *et al.*, 2002). Les données SPOT-VEGETATION (1000 m) ont été employées de la même manière pour répondre à cette thématique. Carreiras *et al.* (2006a) ont discriminé les espaces agricoles, les pâturages et les forêts secondaires en Amazonie Légale tandis que Dubreuil *et al.* (2009) a analysé l'expansion agricole au Mato Grosso. Ces auteurs reprennent les mêmes techniques déjà employées pour discriminer les couverts végétaux naturels et notamment les analyses de données multi-temporelles. Celles-ci se montrent efficaces pour le suivi des cycles phénologiques des cultures. Cependant, la basse résolution spatiale limite la qualité des estimations agricoles. La taille des parcelles est généralement inférieure à la résolution spatiale du capteur et il existe donc de nombreux pixels mixtes (Jakubauskas *et al.*, 2002). Les résultats souffrent alors d'imprécisions de l'ordre de 50% lorsqu'il s'agit de discriminer les types de culture (Jakubauskas *et al.*, 2002).

Des recherches récentes ont prouvé l'intérêt de la moyenne résolution spatiale pour s'affranchir du problème de pixels mixtes. Les résultats se sont montrés prometteurs pour la cartographie des surfaces agricoles dans des pays comme les Etats-Unis ou le Brésil où l'agriculture est caractérisée par des grandes parcelles. De nombreux auteurs sont parvenus à différencier les cultures des couverts végétaux naturels à partir de données MODIS (Ducos, 2003 ; Jasinski *et al.*, 2005 ; Anderson, 2004 ; Jonathan, 2005 ; Doraiswamy *et al.*, 2007a ; Wardlow et Egbert, 2005 ; Wardlow *et al.*, 2007 ; Wardlow et Egbert, 2008 ; Brown *et al.*, 2007 ; Galford *et al.*, 2008). Des recherches ont ensuite affirmé que ces mêmes données présentaient également un potentiel intéressant pour discriminer les cultures aux Etats-Unis

(Wardlow *et al.*, 2007). Ces auteurs ont cartographié les parcelles de maïs, soja et sorgho au Kansas à partir de données multi-temporelles traitées par un arbre de décision (Wardlow et Egbert, 2005 ; Wardlow et Egbert, 2008). Une méthode similaire a été appliquée par Doraiswamy *et al.* (2007a) pour la détection du maïs et du soja en Iowa et Illinois. Chang *et al.* (2007) ont complété ces travaux en intégrant des attributs de séries temporelles et des données de température de surface MODIS dans un arbre de régression. Lobell et Asner (2004) ont développé une approche probabiliste basée sur les principes du démixage spectral (Shimabukuro et Smith, 1991) afin de cartographier les cultures au nord du Mexique et au sud des Etats-Unis.

2.1.2.2. Détection des changements d'utilisation du sol : l'intensification agricole

L'intensification agricole passe par l'utilisation de nouvelles technologies. Celles-ci ont pour but de rendre la production plus durable, i. e. d'augmenter la productivité tout en préservant les services écosystémiques (Aldy *et al.*, 1998). C'est ce que Cassman *et al.* (1999) nomment « *intensification écologique* ». L'utilisation de nouvelles technologies consiste à appliquer de nouvelles pratiques culturales (irrigation, fertilisants, modes de semis, rotations...). La télédétection peut être considérée comme une de ces nouvelles technologies dans ce sens qu'elle permet (i) d'améliorer les pratiques culturales et (ii) de cartographier les pratiques culturales pour évaluer leur degré d'adoption par les producteurs.

L'amélioration des pratiques culturales par la télédétection favorise l'emploi d'images haute résolution : on parle d'agriculture de précision¹ (Moran *et al.*, 1997 ; Cassman, 1999). Ces images présentent un potentiel intéressant pour aider à la gestion des variables stables (qualité des sols, rendements) et instables (humidité du sol, besoins en nutriments, invasions de maladies, d'insectes ou de plantes adventices) au cours d'une récolte (Moran *et al.*, 1997 ; Pinter *et al.*, 2003).

Dans le cadre de cette thèse, c'est surtout l'apport de la télédétection pour la cartographie des pratiques culturales qui nous intéresse. Tous les changements de pratiques culturales ne sont pas détectables par les images satellitaires. Leff *et al.* (2004) écrivent même : « *while remotely sensed data are able to delineate some of the patterns of agricultural land cover, they are unable to distinguish some of the important features of agricultural land use practices such as the different types of cropping systems (crop varieties, crop rotations, intercropping, multiple cropping), agricultural inputs (irrigation, fertilization, machinery), and outputs (yield, production)* ».

Si il est vrai que les applications de la télédétection dans ce domaine sont limitées, les propos de Leff *et al.* (2004) sont tout de même à relativiser. Comme il a été vu auparavant, des études récentes démontrent déjà l'apport de la télédétection pour la cartographie des types de cultures (Wardlow et Egbert, 2005 ; Doraiswamy *et al.*, 2007a ; Chang *et al.*, 2007 ; Fritz *et al.*, 2008). Cet aspect est important car il permet par exemple d'estimer le degré de diversification agricole d'une région. Paradoxalement, Leff *et al.* (2004) ont eux même identifié le faible degré de diversification agricole en Amazonie à l'aide de données satellitaires et de recensements agricoles.

¹ “A precision agriculture approach is required to insure that the requisite resources for crop growth are available and crop protection needs are met without deficiency or excess at each point in time during the growing season” (Cassman *et al.*, 1999).

La détection des cycles culturaux est un autre domaine dans lequel la télédétection peut s'avérer utile. Les données multi-temporelles représentent encore une fois le meilleur outil pour ce type d'étude. En Chine, les données MODIS (résolution de 8 jours) ont été employées par Mingwei *et al.* (2008) pour la détection des double cultures à partir d'analyses de Fourier. Brown *et al.* (2007) ainsi que Galford *et al.* (2008) ont effectué les mêmes recherches au Mato Grosso. Ils ont ainsi démontré que les surfaces cultivées en double cultures avaient sensiblement augmenté depuis le début des années 2000 (+49%) (fig. 2.1). Cependant, ces deux études ont été appliquées à une échelle locale, autour des communes de Vilhena (Etat du Rondonia, voisin occidental du Mato Grosso) (Brown *et al.*, 2007) et de Comodoro (commune située à l'ouest du Mato Grosso) (Galford *et al.*, 2008). Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches pour valider ces résultats à une échelle régionale et déterminer si il existe une variabilité spatiale entre différentes régions agricoles. En effet, des facteurs locaux peuvent influencer sur la capacité des producteurs à adopter les modes de production en double cultures. Par exemple, des critères tels que la durée de la saison pluvieuse, la présence d'instituts de recherche, l'ancienneté de la colonisation, l'origine des producteurs ou la taille des exploitations sont autant de facteurs pouvant expliquer des variations dans le degré d'intensification agricole.

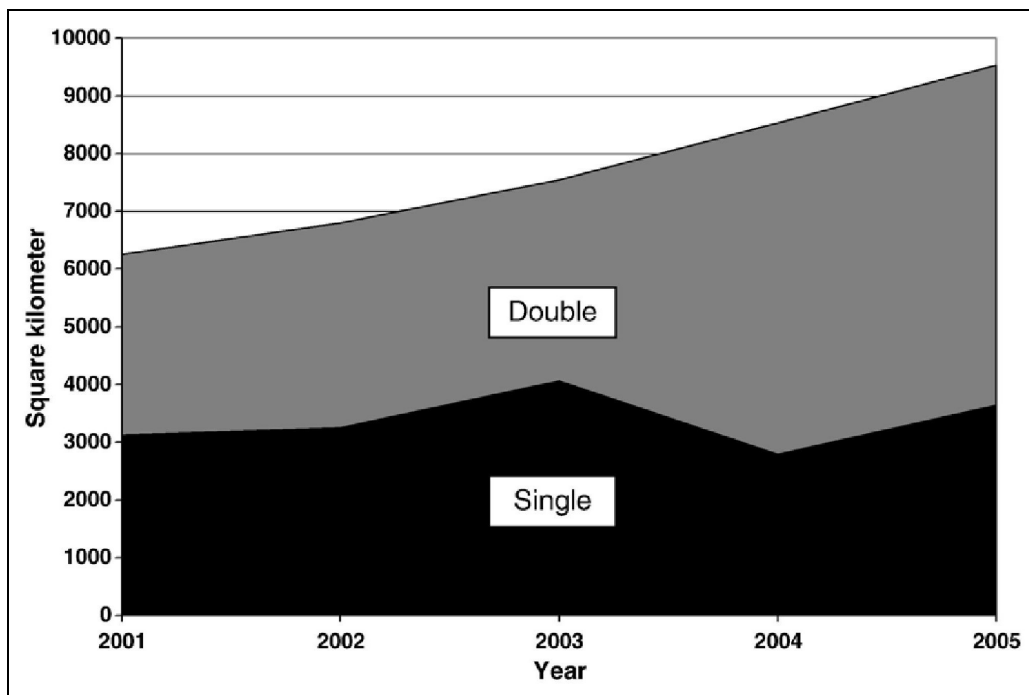


Figure 2.1 : Evolution des surfaces agricoles semées en simple ou double culture à Comodoro (est du Mato Grosso), dans une région de 40 100 km² (Galford *et al.*, 2008).

D'autres recherches plus isolées ont tenté de réaliser un suivi de pratiques culturales plus complexes. Par exemple, Wardlow et Egbert. (2008) ont distingué les parcelles irriguées des parcelles non-irriguées dans les grandes plaines américaines. South *et al.* (2004) ont utilisé les données Landsat-TM pour détecter les parcelles couvertes par des résidus végétaux après les récoltes afin de cartographier les modes de semis (direct ou conventionnel) à une échelle locale aux Etats-Unis (région située entre les Etats du Michigan, de l'Ohio et de l'Indiana).

2.2. Analyse intégrée des changements d'occupation et d'utilisation du sol

La cartographie des changements d'occupation du sol n'est qu'un outil pour aider à la compréhension de leurs mécanismes. Ces cartes doivent donc être croisées avec d'autres informations dans le cadre d'analyses intégrées. Les apports de la télédétection sont ainsi mis en relation avec les sciences sociales, économiques et géographiques pour déterminer la dynamique régissant les changements observés. Ce type d'étude a notamment été appliqué pour qualifier le lien entre la déforestation et l'expansion agricole.

2.2.1. L'expansion agricole, un vecteur de déforestation

Environ 12% des surfaces terrestres du monde sont cultivées aujourd'hui, soit 18 millions de km² (Leff *et al.*, 2004). Les régions agricoles connaissent une dynamique spatio-temporelle forte caractérisée par un léger recul dans les régions tempérées et une hausse dans les régions tropicales (Lepers *et al.*, 2005). L'expansion des cultures en zone inter-tropicale a dès lors été reconnue comme une cause majeure de déforestation (Geist et Lambin, 2001). En cartographiant les principaux changements d'occupation du sol entre 1981 et 2000 à l'échelle du globe, Lepers *et al.* (2005) démontrent que les régions les plus défrichées correspondent en partie aux régions d'expansion agricole (fig. 2.2). Le Sud-Est asiatique est particulièrement touché. En Amazonie, l'arc de déforestation apparaît clairement tandis que l'expansion agricole se repère surtout au sud-est du bassin, i.e. au Mato Grosso.

A l'échelle de l'Amazonie Légale, le projet PRODES¹ estime que la déforestation s'élève à 318369 km² entre 1990 et 2007. L'IBGE² de son côté évalue l'augmentation des superficies cultivées³ à 162065 km² sur la même période. Mais l'expansion agricole ne touche pas que la forêt amazonienne. Environ 26000 km² de cerrado auraient déjà été convertis en Amazonie Légale (Mayaux *et al.*, 2005). En combinant des données satellitaires et des recensements officiels de l'IBGE dans les bassins amazoniens et Tocantins sur la période 1980-1995, Cardille et Foley (2003) ont estimé que les surfaces cultivées ont augmenté de 0,8 million d'hectares (passant de 14 à 14,8 millions d'hectares) tandis que les pâturages semés se sont accrus de 14,6 millions d'hectares (passant de 14,6 à 29,2 millions d'hectares). Cette forte augmentation est à relativiser puisque les pâturages naturels (situés sur des parcelles abandonnées en forêt ou cerrado) ont reculé de 8,4 millions d'hectares sur la même période (passant de 25 à 16,7 millions d'hectares), indiquant donc qu'une partie de l'expansion agricole s'est faite aux dépens des pâturages naturels, i. e. des parcelles abandonnées. L'expansion agro-pastorale nette s'élèverait donc à 7 millions d'hectares entre 1980 et 1995. Sur les 25,32 millions d'hectares défrichés en Amazonie entre 1980 et 1995, les auteurs estiment que 12,84 millions d'hectares (50,7%) étaient semés en pâturage ou cultivés en 1995. Ces chiffres doivent être aujourd'hui revus puisque les années 2000 ont connu une forte expansion des surfaces agricoles (de l'ordre de 3,6 millions d'hectares en Amazonie Légale entre 2001 et 2004) (Morton *et al.*, 2006).

Ces chiffres expriment l'importance des changements d'utilisation du sol se produisant à l'échelle du bassin amazonien mais ils ne représentent pas la variabilité régionale existante. Cardille et Foley (2003) précisent ainsi que les surfaces cultivées ont stagné voire diminué dans certains Etats (est du Para, Goias) alors qu'elles ont fortement augmenté dans d'autres Etats. Au Mato Grosso notamment, les surfaces cultivées et les pâturages semés ont cru de 1,4 et 6 millions d'hectares respectivement entre 1980 et 1995. Cet Etat a donc fait l'objet de

¹ http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2007.htm

² <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=t&o=11>

³ N.B. : Les estimations de superficie cultivée sont largement surestimées car les parcelles cultivées en doubles cultures sont comptabilisées deux fois.

recherches particulières. Morton *et al.* (2006) ont été les premiers à analyser le lien entre la déforestation et l'expansion agricole à l'échelle du Mato Grosso. Puisque leur étude se base sur l'emploi de données MODIS, ces auteurs se sont intéressés à une période plus récente (2001-2004) que celle choisie par Cardille et Foley (2003). Leurs estimations ont été croisées avec les cartes de déforestation issues du projet PRODES et les résultats sont présentés en figure 2.3. Les conversions directes de forêt en culture s'élèveraient à 540000 ha sur cette période de 4 ans. L'expansion agricole expliquerait alors entre 13 et 23% (maximum en 2003) de la déforestation annuelle dans cet Etat. Morton *et al.* (2006) précisent que l'expansion agricole ne se fait pas simplement aux dépens du couvert forestier : 36% de l'expansion serait liée à la conversion de pâturages (naturels ou semés) et 30% de l'expansion se serait produite en région de cerrado. Ces résultats permettent aux auteurs de (i) réfuter l'affirmation que l'expansion agricole se produit seulement sur des terres abandonnées (Brandão *et al.*, 2006 ; Gomes de Oliveira, 2006), et (ii) réfuter l'affirmation que l'intensification agricole réduit la déforestation. Si l'étude de Morton *et al.* (2006) est la plus complète à ce jour à l'échelle du Mato Grosso, deux limites principales existent qu'il convient de préciser : (i) les surfaces cultivées considérées sont surtout celles semées en double culture car il existe une forte confusion dans les données satellitaires multi-temporelles entre les pâturages et les parcelles cultivées en simple culture, et (ii) les cartes de déforestation employées (PRODES) ne prennent pas en compte les défrichements dans le *cerrado*. Ainsi, il est nécessaire d'améliorer cette méthode et d'affiner les résultats.

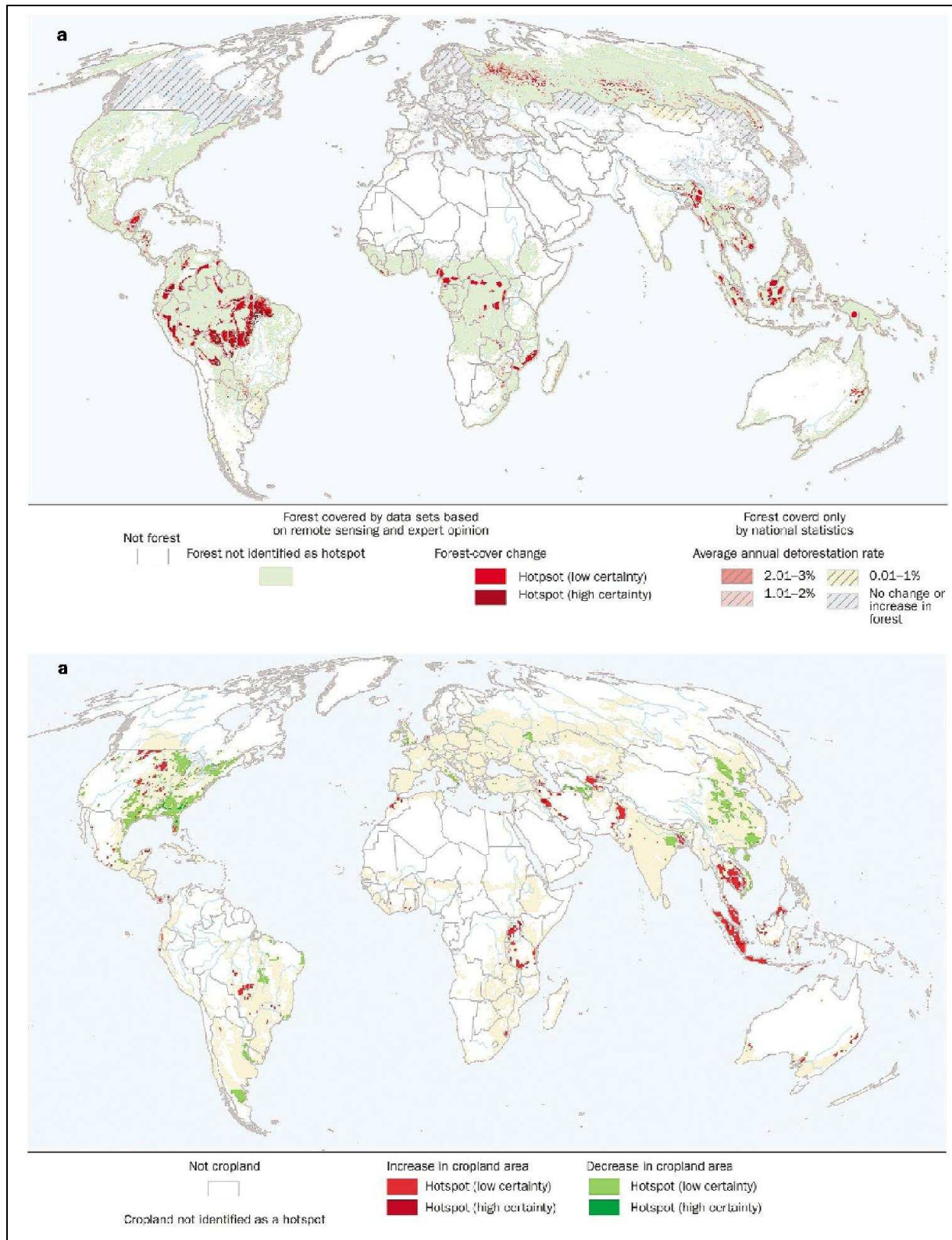


Figure 2.2 : Cartes de déforestation (haut) et de dynamique agricole (bas) dans le monde entre 1981 et 2000 (Lepers *et al.*, 2005). Ces cartes ont été réalisées en combinant des données satellitaires, des recensements nationaux et des opinions d’experts.

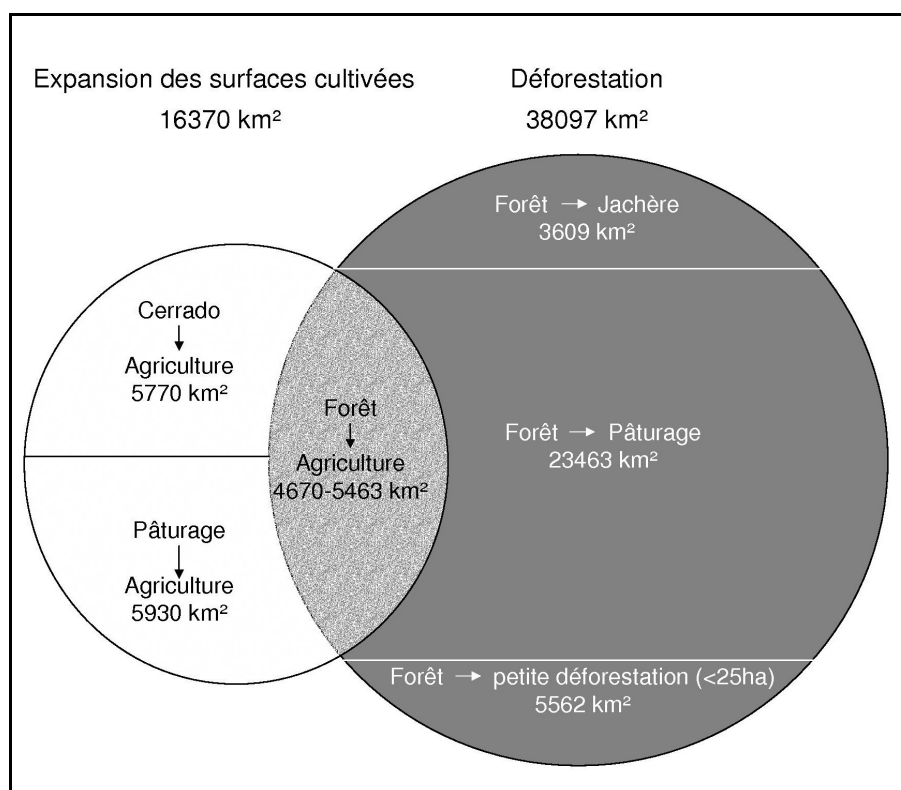


Figure 2.3 : Relation entre expansion agricole et déforestation au Mato Grosso entre 2001 et 2004. Seules les transitions de forêt, cerrado ou pâturage vers les systèmes de production agricole en double culture sont considérés (Morton *et al.*, 2006).

En mettant en avant le lien entre expansion agricole et déforestation, Morton *et al.* (2006) ont précisé qu'il existait une forte variabilité spatiale de cette relation à l'intérieur même du Mato Grosso. Selon ces auteurs, l'agriculture est surtout reconnue comme un vecteur de déforestation dans le bassin du Xingu et le long de la route BR163, autour des principaux centres de production (Sorriso, Lucas do Rio Verde, Sinop). L'élevage extensif prédomine par contre dans le nord et l'ouest de l'Etat, représentant environ 30% du paysage Mato-Grossense (Dubreuil *et al.*, 2008).

Des études à échelle plus fine ont donc cherché à caractériser cette relation agriculture-déforestation dans les régions de frontière agricole. A Sorriso, Anderson *et al.* (2003) ont mis en avant l'importance du facteur « soja » sur la déforestation du cerrado sur une zone d'étude restreinte à une scène Landsat. En 1986-1987, la culture du soja ne faisait pas encore pression sur les changements d'utilisation du sol (2,5% du *cerrado* transformé en culture de soja). Par contre, en 2000-2001, 19,2% du *cerrado* avait été transformé en soja. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Brannstrom *et al.* (2008) à l'est du Mato Grosso. Ceux-ci estiment, à partir de données Landsat, que 36% du cerrado a été converti en agriculture ou en pâturage entre 1986 et 2002. Ces auteurs mettent par ailleurs en avant l'aspect fragmenté du cerrado mato-grossense qui réduit sa capacité à fournir des services écosystémiques et complique la mise en place de systèmes de conservation.

2.2.2. Les mécanismes de la déforestation et de l'expansion agricole

Ces études démontrent donc que l'agriculture est un vecteur important de déforestation. Il s'agit à présent de comprendre quels sont les mécanismes à la base des changements d'occupation du sol en Amazonie. « *Remotely sensed imagery has facilitated estimates of*

land change over the past decade, but this task is minor in comparison to that of the explication of the observed change by assignment of causal power to candidate factors » (Carr *et al.*, 2005). Selon Geist et Lambin (2001), les facteurs déterminant la déforestation en région tropicale se répartissent en trois catégories : (i) les causes immédiates (expansion de l'agriculture, extraction du bois, extension des infrastructures), (ii) les causes sous-jacentes (facteurs économiques, facteurs institutionnels, facteurs technologiques, facteurs culturels ou socio-politiques et les facteurs démographiques) et (iii) les autres facteurs (environnement biophysique, événements déclencheurs naturels – sécheresses, feux de forêts – ou sociaux – guerres civiles...). De nombreuses variables, démographiques, spatio-économiques et biophysiques ont alors été analysées pour illustrer ces facteurs.

L'augmentation de la population est couramment perçue comme la principale cause de déforestation à l'échelle globale et régionale¹ (Laurance, 1999 ; Carr *et al.*, 2005). Parmi les pays du bassin amazonien, la taille de la population nationale résidant dans le bassin explique 2/3 de la variation des taux moyens de déforestation (Laurance, 1999). En région tropicale, les taux de déforestation sont en fait surtout corrélés avec la densité de population rurale (Laurance *et al.*, 2002). L'Amazonie, et notamment le Mato Grosso, représente cependant un cas particulier puisque la déforestation y augmente en même temps que l'urbanisation (Carr *et al.*, 2005). Ceci signifie que toutes les populations rurales ne doivent pas être « logées à la même enseigne ». Selon Laurance *et al.*, (2002), les *latifundios* sont responsables de 50 à 70% de la déforestation². Ceci est confirmé par Brandão et Souza (2006) selon lesquels la déforestation dans les projets de colonisation publique³ ne représentait que 15% du total défriché en Amazonie en 2004. Cela ne signifie pas pour autant que la déforestation n'existe pas dans ces territoires puisque les mêmes auteurs estiment que 49% de la superficie des *assentamentos* était défrichée à la même date. Au Mato Grosso, où l'INCRA (Institut National de Colonisation et Réforme Agraire) comptabilise 383 projets *d'assentamento* en 2006 (pour une superficie totale de 41800 km²), le taux de déforestation atteint même les 62% (Brandão et Souza, 2006).

Pour Laurance *et al.* (2002), la densité de population urbaine est moins corrélée aux taux de déforestation. Cependant, la taille des villes influe sur l'extension du déboisement dans sa périphérie, notamment par les modes de consommation qui y sont pratiqués (Carr *et al.*, 2005). Nédélec (2005) distingue quatre classes de villes (des villes dont la population est supérieure à 50000 habitants aux villes dont la population est inférieure à 5000 habitants) et trois couronnes concentriques autour de celles-ci (1^{ère} couronne = plus de 2/3 de la surface est défrichée, 2^{ème} couronne = plus de 1/3 de la surface est défrichée, 3^{ème} couronne = moins de 1/3 de la surface est défrichée). Il conclut que la taille de ces couronnes et donc l'importance du déboisement sont liées à la taille de la ville⁴.

¹ Deux théories s'opposent à ce sujet (Carr *et al.*, 2005). Selon la théorie « malthusienne », la population croissant plus rapidement que la production agricole, les conversions de forêts en cultures sont inévitables pour répondre aux besoins (Hecht, 2005). Au contraire, Boserup (1970) et Borlaug (in Brown *et al.*, 2007) pensent que l'augmentation de la population se traduira par une intensification agricole plus efficace qui permettra de limiter la déforestation.

² Au sud du Para, Fearnside (2001) affirme que plus de 50% des surfaces défrichées par le projet PRODES en 1997-98 et ont une superficie supérieure à 100 ha, ce qui excède largement les capacités de déboisement des petits producteurs. Cela se vérifie aussi au Mato Grosso où Morton *et al.* (2006) indiquent que les parcelles de forêt ou cerrado converties en agriculture ont une superficie moyenne de 333 ha (contre 143 ha en moyenne pour les parcelles converties en pâturages).

³ En 2002, 1354 projets de colonisation publique (*assentamentos*) représentant 231000 km² existaient en Amazonie brésilienne

⁴ Ce modèle d'occupation de l'espace se rapproche du modèle de Von Thünen en cercles radio-concentriques autour d'un centre.

Outre la distance aux centres urbains, la distance aux axes de communication (routes, fleuves) sont des variables spatio-économiques représentant le rôle des institutions dans les processus de déforestation. A l'échelle du bassin amazonien, il existe une forte corrélation entre les grands axes routiers (routes transamazoniennes) et les principaux centres de déforestation (Théry, 1997 ; Laurance, 1999 ; Nepstad *et al.*, 2001 ; Nédélec, 2005 ; Fearnside, 2005b ; Fearnside, 2006 ; Carreiras *et al.*, 2006a). L'expansion du réseau routier favorise en effet l'accès aux forêts par les éleveurs et les colons (Laurance *et al.*, 2001). Plus des deux tiers de la déforestation en Amazonie est ainsi localisée à moins de 50 km d'une route asphaltée (Nepstad *et al.*, 2001). A une échelle locale, l'impact des routes vicinales partant de part et d'autres des axes principaux est également démontré (Théry, 1997). Au fur et à mesure que le front pionnier progresse, ces routes vicinales se transforment en réseau routier secondaire pour répondre aux besoins des populations déjà installées. Ce réseau secondaire facilite à son tour l'arrivée de nouveaux colons le long de nouvelles routes vicinales. Théry (1997) conclut alors : « *la coïncidence entre les déboisements et l'ouverture des routes est donc totale, car ils sont à la fois cause et conséquence l'un de l'autre...* ». Weinhold et Reis (2008) ont cherché à affiner la compréhension de ce rapport entre routes et déforestation. Leurs résultats montrent que, si les axes routiers dans des régions encore vierges sont bel et bien un vecteur de déforestation, leur implantation dans des espaces déjà colonisés entraîne une réduction des déboisements. La baisse des coûts de transport (variables selon les créations ou les asphaltages de routes) dans des centres économiquement actifs engendre une augmentation de la productivité qui fait baisser la pression sur la forêt. Pour ces auteurs, les déboisements ont donc tendance à induire la baisse des coûts de transport plutôt que l'inverse. Ces théories illustrent donc le débat en cours sur cette relation route-déforestation.

Aujourd'hui, un sujet sensible en Amazonie concerne l'asphaltage de la route BR163 reliant Cuiaba à Santarem (Para). Cette route doit relier les régions du sud et surtout São Paulo à la région nord. Les agriculteurs attendent avec impatience son asphaltage promis par l'Etat fédéral depuis plus de 20 ans. En effet, cela permettrait de réduire les coûts de transport internes jusqu'aux ports d'exportation/importation et d'augmenter ainsi les rendements et la viabilité du complexe soja (Mendez del Villar *et al.*, 2005 ; Fearnside, 2006 ; Brandão *et al.*, 2006 ; Vera-Diaz *et al.*, 2008). Mais sa réalisation est redoutée car elle inciterait l'arrivée de nouveaux colons et augmenterait la déforestation (Nepstad *et al.*, 2001). Soares-Filho *et al.* (2004) ont ainsi démontré par modélisation que la création de cette route entraînerait des taux de déforestation élevés si une gouvernance efficace n'était pas mise en place auparavant... ce qui n'est pas encore le cas dans la région (Fearnside, 2006). Au contraire, Brandão *et al.* (2006) estiment que l'asphaltage permettrait justement d'améliorer cette gouvernance et donc de mieux préserver la forêt.

La création de routes et de villes résulte de l'application des politiques colonisatrices mises en place à partir des années 1970. Celles-ci ont donc contrôlé indirectement la déforestation en Amazonie. Mais aujourd'hui la situation a changé et il semblerait que la déforestation soit davantage le fruit de processus économiques que politiques (Le Tourneau, 2004). Des variables économiques ont donc été employées pour expliquer les changements d'occupation du sol. L'expansion des superficies cultivées en soja a notamment été corrélée aux variations des prix du soja. Morton *et al.* (2006) ont ainsi trouvé une forte corrélation ($R^2 = 0,72$) entre les surfaces défrichées à des fins agricoles et les cours du soja (cf Partie 1 – Chapitre 4). Brandão *et al.* (2006) ajoutent que, outre l'importance des cours du soja, les prix payés aux producteurs sont aussi dépendants des taux de change. Ils affirment ainsi que le

changement de politique de taux de change de janvier 1999 a permis d'améliorer la rentabilité de la production du soja et a donc incité à accroître les surfaces cultivées.

Enfin, le milieu physique est un facteur important à prendre en compte pour comprendre les mécanismes menant aux changements d'occupation du sol. Des variables telles que le type de végétation, le type de sol, l'altitude, la pente, les précipitations sont autant d'éléments déterminant la localisation des fronts pionniers (Laurance *et al.*, 2002 ; Soares-Filho *et al.*, 2002 ; Nédélec, 2005 ; Jasinski *et al.*, 2005). L'installation des colons est facilitée dans les régions dont le climat est marqué par une forte saison sèche (Laurance *et al.*, 2002). Ceci s'explique par le fait que ces régions présentent des sols plus fertiles et une végétation de transition plus facile à défricher que la forêt ombrophile. Jasinski *et al.* (2005) ajoutent que la pente est également un vecteur intervenant dans la compréhension des modes d'occupation du sol. Les surfaces planes sont plus facilement défrichées car elles présentent un intérêt pour l'agriculture mécanisée.

La combinaison de facteurs biophysiques, économiques et édaphiques permet de conclure que 29% (1,4 million de km² dont 0,4 million de km² situés dans des réserves protégées) du bassin amazonien présentent les conditions adéquates à l'obtention de rendements de soja supérieurs à 2 tonnes/ha (Vera-Diaz *et al.*, 2008). Plus précisément, environ 1 million de km² sont potentiellement rentables (plus de 200 US\$/ha) pour la production du soja en Amazonie. 85% de cette superficie est située dans les Etats du Mato Grosso, Para, Maranhão et Tocantins (Vera-Diaz *et al.*, 2008), i.e. sur l'arc de déforestation (fig. 2.4). En 2007, 59 146 km² de soja étaient cultivés en Amazonie¹. Il existe donc un potentiel d'expansion du soja énorme au Brésil (confirmé par l'Embrapa qui considérait en 2002 qu'il restait environ 500000 km² de cerrado potentiellement exploitables pour l'agriculture au Brésil). Ainsi, le rapport entre l'expansion agricole et la déforestation pourrait continuer à exister durant de longues années.

L'apport de la télédétection pour l'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol est indéniable. En milieu rural, les images satellites ont prouvé leur efficacité pour la détection de la déforestation et des surfaces cultivées. Ces résultats sont surtout liés au potentiel de ces données pour la discrimination des couverts végétaux (naturels ou anthropiques) liée aux caractéristiques biophysiques des végétaux. Il convient donc de présenter les principes fondamentaux de la télédétection des couverts végétaux. Ceci est fait dans la première partie de ce chapitre. Par ailleurs, parmi les données satellites couramment employées pour ce type d'étude, les données fournies par le capteur MODIS s'avèrent particulièrement intéressantes de par leur résolution spatiale moyenne et leur haute résolution temporelle. Les principales caractéristiques de ce capteur sont donc présentées dans la deuxième partie de ce chapitre.

¹ D'après les données de l'IBGE (<http://www.sidra.ibge.gov.br>) pour les Etats du Mato Grosso, Tocantins, Maranhão, Acre, Rondonia, Amapa, Para, Roraima, Amazonas dans leur intégralité.

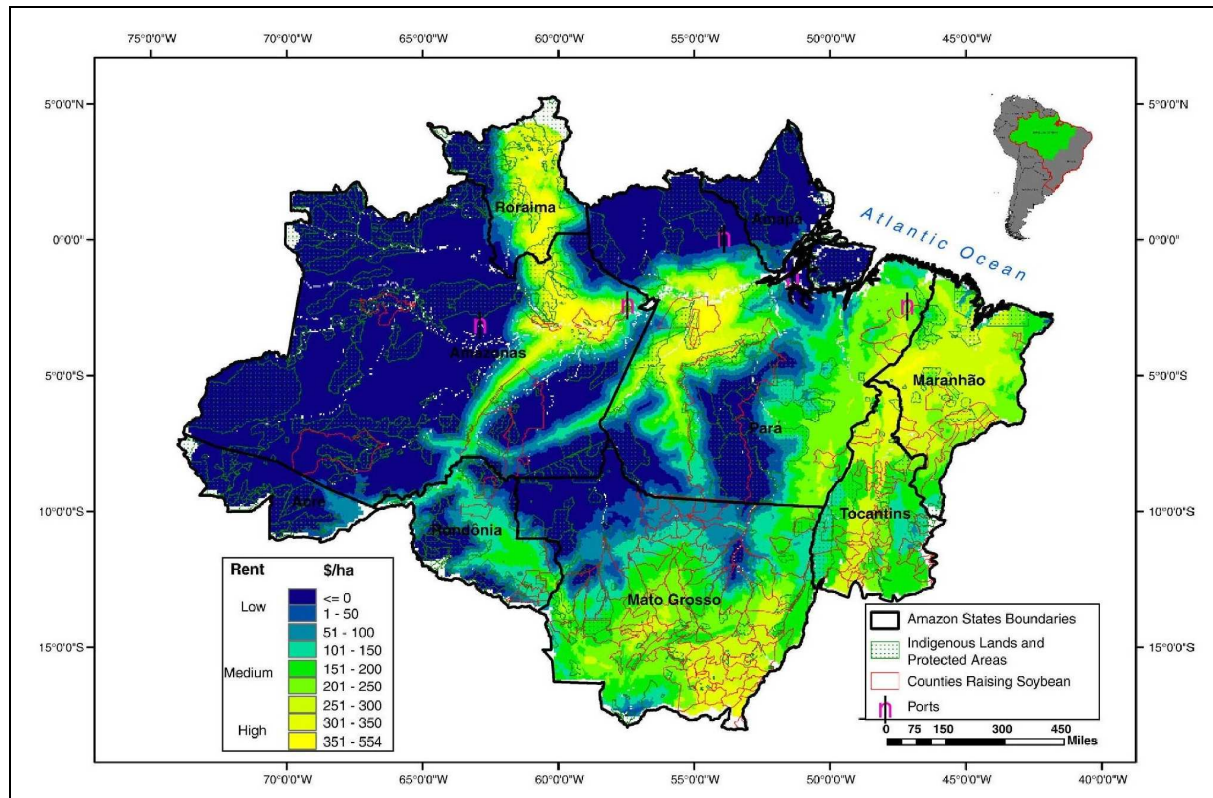


Figure 2.4 : Estimation de la rentabilité du soja en Amazonie. Les surfaces en jaune représentent les régions où la rentabilité pourrait être supérieure à 200 US\$/ha (Vera-Diaz *et al.*, 2008).

3. Les principes de la télédétection des couverts végétaux : application aux données MODIS

3.1. Les principes fondamentaux de la télédétection des couverts végétaux

Chaque essence végétale a sa propre signature spectrale mais les végétaux ont tous le même comportement spectral (Robin, 1995). Celui-ci correspond aux mesures de réflectances enregistrées dans différentes longueurs d'ondes. Il est influencé par des facteurs externes et internes au couvert qui affectent les propriétés optiques des végétaux (Guyot, 1983). Parmi les facteurs externes, la hauteur du soleil, l'angle zénithal de visée, les troubles atmosphériques et la vitesse du vent (qui modifie la géométrie du couvert) sont les plus récurrents. Les principaux facteurs internes au couvert font notamment référence à la structure géométrique des feuilles et du couvert végétal (la distribution des angles des feuilles, la couverture foliaire, l'orientation des rangs de culture), les propriétés optiques du sol et les maladies (Guyot, 1983 ; Ponzoni et Shimabukuro, 2007).

Le comportement spectral de la végétation se résume par une faible réflectance dans les bandes spectrales du visible et une forte réflectance dans le proche infrarouge (fig. 2.5). Selon Bariou (1978), la faible réflectance dans le domaine du visible est due au rôle des pigments qui sont responsables d'une forte absorption de la lumière. Toutefois, parmi ces pigments, la chlorophylle réfléchit plus la lumière dans les longueurs d'ondes du vert tandis qu'elle connaît un pic d'absorption dans le rouge (Ponzoni et Shimabukuro, 2007). Dans le domaine du proche infrarouge, la réflectance est élevée (30 à 70%) et le reste de la lumière est

transmise. C'est généralement dans cette longueur d'onde qu'il est le plus aisé de discriminer les végétaux (Bariou, 1978). Dans le domaine de l'infrarouge moyen, plus la teneur en eau est forte, plus l'émission diminue. La structure de la canopée joue également un rôle dans cette longueur d'onde. Enfin, dans le domaine du thermique, les couverts végétaux ont des émissivités d'autant plus élevées que le couvert est riche en chlorophylle et en eau (Robin, 1995). La signature spectrale de l'objet correspond en fait à sa température de surface.

Le comportement spectral des végétaux peut également être étudié dans le temps selon des longueurs d'ondes données. Dans le domaine du visible (0,4 – 0,7 μm), la lumière contrôle le mécanisme de production de la plante, i.e. la photosynthèse. Ainsi, cette bande spectrale est également appelée « photosynthetically active radiation » (PAR) (Malingreau, 1987). Dans ces longueurs d'ondes, lors de la phase de développement des plantes, la réflectance diminue progressivement, à mesure que la canopée du couvert végétal recouvre le sol. Au contraire, dans le proche infrarouge, cette phase de développement se traduit par une augmentation de la réflectance jusqu'à une limite asymptotique liée à la couverture foliaire (Malet, 1983).

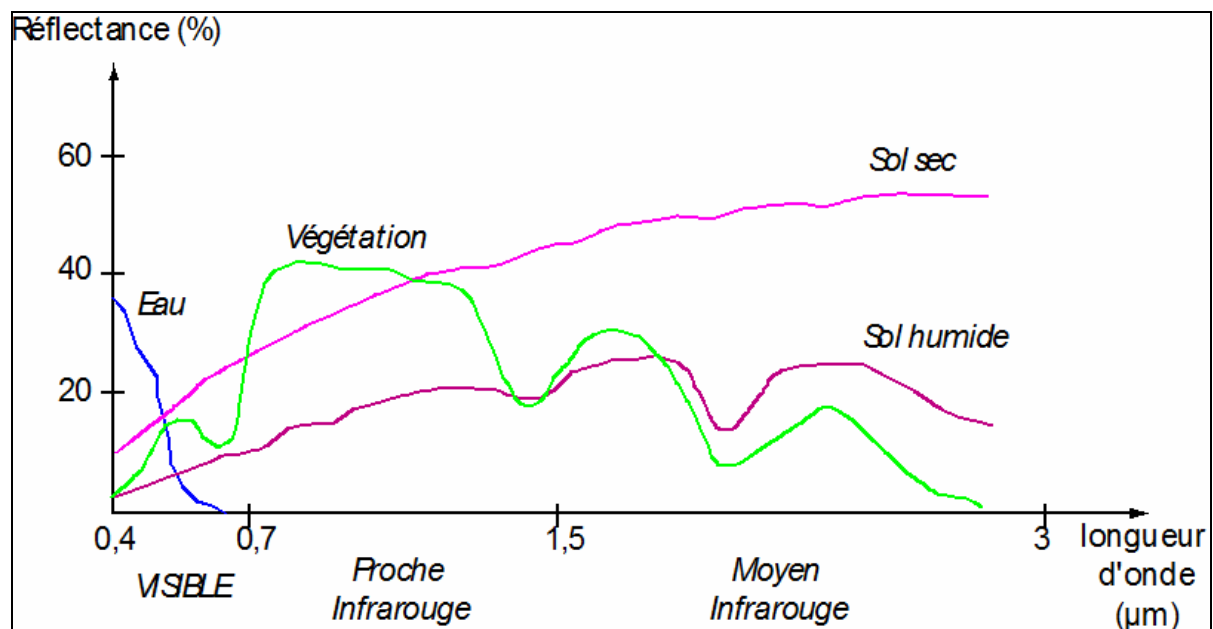


Figure 2.5. Profils spectraux de différents types d'occupation du sol (source : Swain et Davis, 1978).

Les comportements spectraux des végétaux varient donc selon les longueurs d'ondes et le temps, mais cette variation ne suffit pas pour discriminer les différents couverts. L'étude d'une image d'un seul canal ne permet pas de tirer de conclusions sur un couvert végétal. Afin de contourner ce problème, il faut donc « dériver des informations sur la nature et l'état de la végétation en usant de longueurs d'ondes spécifiques sélectionnées pour donner un fort signal de la végétation et un bon contraste avec le sol » (Malingreau, 1987). Cela nous amène à chercher des combinaisons de canaux susceptibles de fournir plus d'informations sur les couverts végétaux. Etant donné que les réponses spectrales les plus opposées se rencontrent dans les longueurs d'ondes du rouge (pic d'absorption) et du proche infrarouge (réflectance intense), les images combinées de ces deux canaux sont les plus à même de fournir des informations utiles pour l'étude des végétaux. De nombreux indices de végétation ont été proposés à partir de ces combinaisons de canaux. Ils représentent « une approche empirique pour identifier et suivre l'évolution temporelle des couverts végétaux, ainsi que pour évaluer

certaines paramètres du couvert comme la biomasse aérienne chlorophyllienne »¹. En outre, ils ont l'avantage de limiter l'effet des facteurs externes au couvert (sol, soleil...) (Baret *et al.*, 1988). Dans le cadre de cette étude, seuls deux indices de végétation sont présentés : le NDVI et le EVI. Ces deux indices ont été choisis car ils sont calculés par les équipes réalisant les produits MODIS utilisés dans cette thèse.

3.1.1. Le NDVI

L'indice de végétation le plus couramment utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) proposé par Rouse *et al.* (1974) et repris par Tucker (1979). Il est défini par la formule :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

où *PIR* et *R* correspondent aux valeurs de réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge et du rouge. L'intérêt de créer un indice basé sur un rapport réside dans le fait que cela réduit plusieurs formes de bruits présents dans plusieurs bandes (Huete *et al.*, 2002). Le NDVI est compris entre -1 et +1, les plus fortes valeurs représentant une végétation active. La réflectance des sols étant quasiment constante dans ces longueurs d'ondes, une valeur faible de NDVI caractérise alors une présence de sols nus.

Le NDVI est employé depuis longtemps à partir de données NOAA-AVHRR, SPOT-Végétation ou MODIS, entre autres (Morissette *et al.*, 2004). Il existe donc une importante base de données et d'informations sur cet indice qui s'avère surtout intéressante dans le cas de comparaisons avec des mesures de NDVI anciennes (Huete *et al.*, 2002, le surnomment « *continuity index* »). Toutefois, quelques limites du NDVI peuvent remettre en question l'utilisation de cet indice. Par exemple, certains facteurs tels que la hauteur du soleil, l'angle de visée, l'hétérogénéité du couvert ou l'atmosphère perturbent les mesures de NDVI. Mais le principal problème concerne surtout sa sensibilité à la contribution spectrale du sol. Selon Huete *et al.* (2002), l'influence du sol est plus sévère lorsque le couvert végétal est entre 40 et 60%. Le NDVI est alors influencé par les variations du sous-couvert et se dégrade d'autant plus fortement que la brillance du sol est forte (Huete *et al.*, 2002). Au contraire, selon Malet (1983), « *cet indice n'est lié de façon sensible à l'état du couvert végétal que lorsque les feuilles couvrent entre 15 et 80% du sol* ». Au delà de ce seuil, le NDVI connaît une saturation (à environ NDVI = 0.9). Celle-ci est liée, d'une part, au fait que le NDVI est un indice basé sur un rapport (Huete *et al.*, 2002), et d'autre part, aux bandes considérées. En effet, dans le rouge et le proche infrarouge, l'augmentation de l'absorption et de la réflectance, respectivement, se produit jusqu'à une limite asymptotique liée à la couverture foliaire (Malet, 1983 ; Ponzoni et Shimabukuro, 2007).

Le NDVI ne s'avère donc pas optimal dans les régions à forte biomasse puisque, en saturant, il ne permet pas de différencier les couverts. Pour ces raisons, d'autres indices ont été proposés parmi lesquels le EVI (Enhanced Vegetation Index).

3.1.2. Le EVI

¹ http://lacan.grignon.inra.fr/ressources/teledetection/comp_spectraux/indices_veget.htm

Le EVI a été conçu initialement pour le capteur MODIS dans le but d'optimiser le signal de la végétation avec une plus grande sensibilité dans les régions à biomasse importante. L'idée est de trouver une méthode permettant de séparer la réponse du sol de celle de la végétation et de réduire les influences de l'atmosphère (Huete *et al.*, 2002).

Le calcul du EVI est défini par :

$$EVI = G \frac{PIR - R}{(L + PIR + C1.R - C2.B)}$$

avec R , PIR et B correspondant aux valeurs de réflectances dans les longueurs d'onde du rouge, du proche infrarouge et du bleu. G est un facteur de gain ($G=2.5$), L est un coefficient d'ajustement du sous-couvert ($L=1$) et $C1$ et $C2$ sont des coefficients de résistance aux effets des aérosols ($C1=6$ et $C2=7.5$) (Huete *et al.*, 2002). Les valeurs mesurées dans les longueurs d'onde du bleu sont les plus affectées par les aérosols et sont donc intégrées pour corriger l'influence de ceux-ci sur les valeurs mesurées dans les longueurs d'onde du rouge (Huete *et al.*, 2002).

Les résultats obtenus par Huete *et al.* (2002) présentent quelques différences du EVI par rapport au NDVI. Notamment, le EVI a des valeurs plus faibles que le NDVI ce qui lui permet de saturer plus tardivement. Le EVI est alors plus sensible quand il s'agit de détecter des forêts en milieu humide. Au contraire, le NDVI est plus utile en milieu semi-aride. D'une manière générale, le EVI et le NDVI s'avèrent tous les deux utiles pour effectuer un suivi spatiotemporel de la dynamique des couverts végétaux puisqu'ils permettent d'observer les variations saisonnières et interannuelles de la végétation (Wardlow *et al.*, 2007 ; Huete *et al.*, 2002). Toutefois, Chen *et al.* (2006) mettent en avant les qualités du EVI par rapport au NDVI pour détecter les cultures au Mexique. Cette supériorité du EVI est confirmée par Ferreira *et al.* (2004) pour la détection des *cerrados*. En fait, Huete *et al.* (2002) précisent que les deux indices sont complémentaires: le NDVI est plus sensible à l'activité chlorophyllienne de la végétation tandis que le EVI est plus influencé par la structure de la canopée.

3.2. Les données MODIS

Diverses données de télédétection ont été employées afin de détecter les changements d'occupation et d'utilisation du sol à partir des études des couverts végétaux. Les données haute résolution (Landsat, SPOT, CBERS) et basses résolutions (NOAA-AVHRR, SPOT VEGETATION) ont beaucoup apporté dans ce domaine (cf. la première sous partie de ce chapitre). Ces deux sources de données sont complémentaires. Les données basses résolutions permettent une cartographie à petite échelle avec une haute répétitivité temporelle favorisant le suivi des cycles phénologiques. Les données hautes résolutions sont utiles à grande échelle et permettent d'obtenir des estimations de superficie plus précises mais leur emploi est limité par une faible résolution temporelle. L'utilisation des données moyennes résolutions s'avère prometteuse puisqu'elle permet de combiner une haute répétitivité temporelle avec une bonne résolution spatiale. Parmi ce type de données, les données issues du spectroradiomètre MODIS sont les plus couramment utilisées.

3.2.1. Présentation des produits MODIS

Le programme EOS (Earth Observing System) mené par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) a été lancé dans les années 1980 avec pour objectif

d'étudier les processus de changements globaux sur Terre. Un groupe de travail interdisciplinaire a été créé pour définir les besoins matériels du projet. Ce groupe a proposé le lancement de 9 plateformes avec à leur bord 24 capteurs permettant l'observation de la Terre pendant une période minimale de 15 ans. Parmi ces capteurs, le Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) est considéré comme le principal instrument du projet. Il a été lancé pour la première fois le 18 décembre 1999 à bord de la première plateforme TERRA avec une espérance de vie d'au moins 6 ans. Un second capteur MODIS a ensuite été mis à bord de la plateforme AQUA mise en orbite le 4 mai 2002.

Ce capteur se présente comme le successeur du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) présent à bord des satellites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) depuis 1978 (TIROS-N). Ces données ont longtemps été considérées comme les meilleures pour l'observation de la Terre à échelle régionale. Le capteur MODIS reprend donc certaines caractéristiques du capteur AVHRR (qui opère dans les longueurs du visible, du proche infrarouge, de l'infrarouge moyen et thermique) tout en y apportant une meilleure résolution spectrale et spatiale. MODIS opère dans 36 bandes du spectre électromagnétique (contre 5 ou 6 pour AVHRR) allant de 0,4 à 14,4 μm . Parmi ces bandes, deux ont une résolution spatiale de 250 m (contre 1000 m pour NOAA-AVHRR), cinq ont une résolution de 500 m et vingt-neuf ont une résolution de 1000 m. La résolution minimale de 250 m a été choisie car elle est considérée comme étant la résolution maximale à laquelle les changements d'occupation du sol sont détectables (Townshend et Justice, 1988).

La résolution temporelle des données MODIS est quasi-journalière ce qui permet de réaliser un suivi précis des changements à l'échelle globale et régionale. Cette haute répétitivité est rendue possible par les caractéristiques orbitales des plateformes TERRA et AQUA. Celles-ci sont à une altitude de 705 km avec une période orbitale de 98,88 minutes. La différence entre les plateformes TERRA et AQUA réside dans les horaires de passage. La plateforme TERRA passe l'équateur en orbite descendante à 10h30 tandis que la plateforme AQUA passe l'équateur en orbite ascendante à 13h30.

Un autre intérêt favorisant l'utilisation des données MODIS concerne leur mise à disposition gratuite. Les images sont disponibles en libre accès sur internet¹ où elles peuvent être téléchargées ou commandées. Au total, 44 produits MODIS sont disponibles selon 4 niveaux de prétraitements. Ces niveaux vont de L0 (Level 0) à L4. Le niveau L0 correspond aux images brutes non traitées. Les images de niveau L1 sont géoréférencées et la qualité des pixels est déterminée. Le niveau L2 présente les données de réflectance des produits qui sont ensuite retraitées pour estimer des variables géophysiques en phase L3. Enfin, le niveau L4 indique que les données de réflectance ont été intégrées dans des modèles d'estimation des variables géophysiques. A partir du niveau L2, les images disponibles correspondent à des scènes (*tile*) de 1200 x 1200 km. Les données sont fournies au format HDF et doivent être transformées par la suite par des logiciels de télédétection tels que IDRISI ou ENVI. Avant d'importer les images, quelques opérations doivent être réalisées grâce à certains outils téléchargeables gratuitement sur internet². Le logiciel MRT (Modis Reprojection Tool) permet par exemple de mosaïquer les scènes adjacentes et de les géoréférencer dans un système de projection souhaité. Le logiciel LDOPE (Land Data Operational Product Evaluation) permet quant à lui d'analyser la qualité de chaque pixel des images considérées.

3.2.2. Les caractéristiques techniques des indices de végétation des produits MODIS

¹ edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp

² <http://igskmncnwb001.cr.usgs.gov/datatools.asp>

Parmi les produits proposés, celui qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de cette étude s'intitule MOD13 (Huete *et al.*, 1999). Ce produit de niveau L3 a été conçu spécialement pour l'étude de la végétation. Les données EVI et NDVI sont fournies à plusieurs résolutions spatiales (250 m, 500 m, 1000 m ou 25 km) ou temporelles (16 jours ou 1 mois). Parmi ces sous produits, le produit MOD13Q1 a une résolution spatiale de 250 m et une résolution temporelle de 16 jours. Ce produit se télécharge en format HDF et contient plusieurs images dont le EVI, le NDVI, les bandes rouge, proche infrarouge et bleu, ainsi que des images de qualité des pixels. La méthode de calcul de ces images est présentée en figure 2.6.

Les bandes rouge et proche infrarouge sont les seules bandes MODIS disponibles à une résolution de 250 m. La bande bleue d'une résolution de 500 m a donc été ré-échantillonnée à 250 m afin de pouvoir être intégrée dans le calcul du EVI. Les indices de végétation sont calculés à partir des données journalières issues du produit MOD09 (niveau L2) ayant subies des corrections atmosphériques. Toutefois, malgré ces corrections, les valeurs d'indices de végétation sont encore largement affectées par des bruits notamment liés à des conditions atmosphériques mauvaises (présence de nuages) ou à des angles de prise de vue trop grands. Pour s'affranchir de ce problème, des compositions d'images sont recrées tous les 16 jours en ne conservant que les pixels de meilleurs qualités.

Selon Huete *et al.* (2002), d'après les caractéristiques orbitales de la plateforme TERRA, entre 0 et 64 observations sont disponibles sur une période de 16 jours. Mais, le nombre de pixels ayant une qualité acceptable est généralement inférieur à 10 et même à 5 sur ce même intervalle de temps. La méthode de calcul de l'indice de végétation est alors dépendante du nombre d'observations valables sur une période de 16 jours :

- Si il existe plus de 5 observations de bonne qualité, la méthode BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function composite) est appliquée. Cette technique consiste à interpoler les valeurs obtenues dans les bandes nécessaires au calcul des indices de végétation selon les mesures des angles de prise de vue et solaires afin d'obtenir une valeur équivalente à une prise de vue au nadir. Toutefois, cet algorithme nécessitant un grand nombre d'observations, il est plus souvent appliqué pendant la saison sèche quand la couverture nuageuse est faible. Ce qui limite son intérêt puisque les parcelles sont peu cultivées à cette période.

- Si il existe moins de 5 observations de bonne qualité, la méthode du CV-MVC (Constrained-View angle-Maximum Value Composite) est appliquée. Cette méthode étudie les deux plus hautes valeurs de NDVI et sélectionne celle dont l'angle de visée est plus proche du nadir.

- Si il n'existe qu'une seule observation de bonne qualité, elle est choisie pour représenter la période de 16 jours.

- Si il n'existe aucune valeur de qualité, la méthode du MVC (Maximum Value Composite) est appliquée. Elle consiste à sélectionner la plus haute valeur d'indice de végétation de la période de 16 jours. Cette méthode a également été couramment employée avec les données NOAA-AVHRR ou SPOT-Végétation.

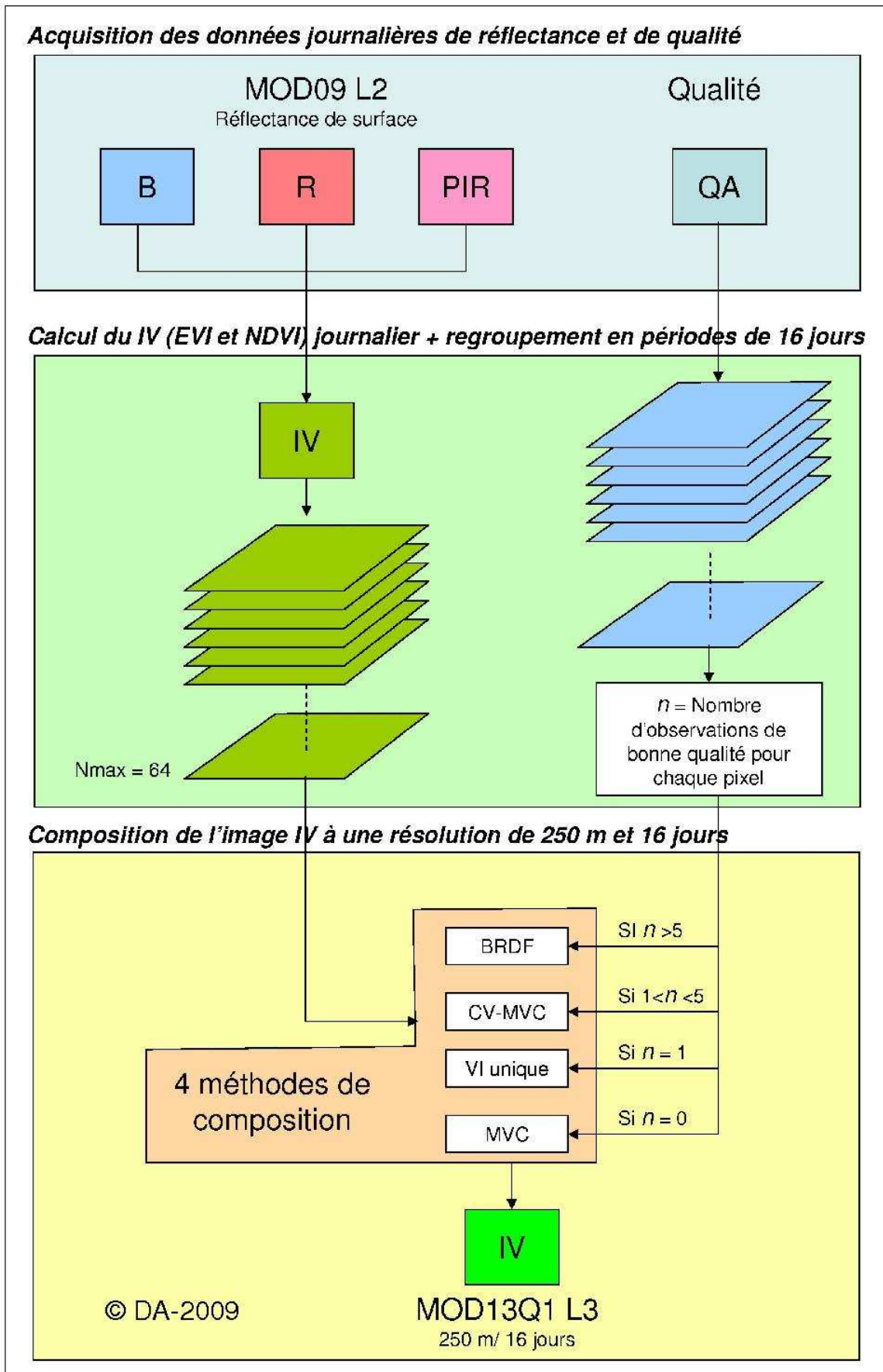


Figure 2.6 : Organigramme de la création des images MOD13Q1 (d'après Huete et al., 2002)

Les caractéristiques présentées ici sont valables pour la version 4 des données MODIS issues des plateformes TERRA et AQUA. Depuis janvier 2007, la version 5 est disponible et inclut quelques nouveautés présentées par Didan et Huete (2006). Par exemple, les images de description de la qualité des pixels ne sont plus créées selon le même algorithme. De nouveaux paramètres tels que le jour de prise d'image de chaque pixel ou la fiabilité des pixels ont également été rajoutés. Les techniques de composition ont été affinées et les méthodes de calcul d'indices de végétation en cas de nuage ont été améliorées. En conséquence, les valeurs de la version 5 sont reconnues pour être environ 1% plus basse que les valeurs de la version 4. Enfin, les données de la version 4 provenant des plateformes TERRA et AQUA ont été jugées trop identiques, ce qui limitait l'intérêt de leur utilisation combinée. Il a été prévu de déphaser les compositions de 16 jours de telle manière que la composition issue de MODIS/TERRA commence 8 jours après celle de MODIS/AQUA (Didan et Huete, 2006). En pratique, il est donc possible d'obtenir à présent des données de NDVI ou EVI tous les 8 jours sans perte de qualité. Il est prévu de retransformer toutes les données de la version 4 sous la version 5 mais ce processus n'est pas encore achevé.

Dans cette thèse, les données de la version 4 de la plateforme TERRA ont été majoritairement utilisées. La version 5 n'a été intégrée qu'à partir de janvier 2007. Ce changement ne pose pas de problème puisque les principales modifications concernent (i) la création des images de qualité qui ne sont pas utilisées ici et (ii) la différence négligeable d'indice de végétation entre les deux versions.

4. Conclusion

L'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol représente une branche majeure des études de télédétection. Dans les régions tropicales, les recherches se focalisent surtout sur les changements affectant la végétation. D'une part, de nombreux auteurs s'attachent à effectuer un suivi des couverts végétaux naturels, que ce soit à échelle globale (Loveland *et al.*, 2000 ; Hansen et Reed, 2000 ; Achard *et al.*, 2002 ; Bartholomé et Belward, 2005 ; ...) ou régionale (Durieux *et al.*, 2001 ; Dubreuil *et al.*, 2002 ; Anderson, 2004 ; ...). L'intérêt est alors de quantifier l'importance des conversions d'occupation du sol, i. e. la déforestation. D'autre part, il s'agit de cartographier les couverts végétaux anthropisés, notamment dans le but d'évaluer l'expansion des cultures et les changements de pratiques culturelles.

Au Brésil et au Mato Grosso, la déforestation est suivie par des instituts de recherche publics (INPE) ou privés (IMAZON) et par les services administratifs en environnement (SEMA). Pour le moment, contrairement à ce qui est fait aux Etats-Unis (projet LACIE) ou en Europe (projet MARS), la cartographie des cultures au Brésil est l'œuvre de recherches plus isolées, menées par des auteurs brésiliens (Anderson, 2004 ; Jonathan, 2005 ; ...) ou étrangers (Cardille et Foley, 2003 ; Morton *et al.*, 2006 ; ...). Après avoir surtout cherché à déterminer l'expansion des cultures au cours des années 1990-2000, quelques travaux commencent aujourd'hui à s'orienter vers la détection des nouvelles pratiques culturelles afin de suivre la tendance à l'intensification agricole. Les systèmes de production en double cultures commerciales ont notamment été étudiés par Galford *et al.* (2008) et Brown *et al.* (2007) à l'échelle locale.

Toutes ces études s'appuient sur l'application de techniques avancées en télédétection. Celles-ci sont en effet particulièrement efficaces pour discriminer les couverts végétaux à partir d'indices de végétation intégrant des données prises dans les longueurs d'onde du

proche infrarouge. Pour des études à l'échelle régionale, les images issues du capteur MODIS placé sur les plateformes TERRA et AQUA sont intéressantes par leur résolution spatiale (250 m) et temporelle (1 à 2 jours). Dans cette thèse, les synthèses d'indice de végétation EVI sont employées sous forme de séries temporelles permettant de discriminer les couverts végétaux en fonction de leurs cycles phénologiques. La cartographie de la végétation à partir de données multi-temporelles nécessite l'application de méthodes de classification rigoureuses qui sont présentées au chapitre suivant.

Chapitre 6. Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation

1. Introduction

Les indices de végétation sont des outils efficaces pour l'analyse des conditions de surface des couverts végétaux. Leur étude sous forme de séries temporelles, rendue possible par la haute répétitivité des images satellites MODIS/TERRA, illustre notamment les cycles phénologiques des plantes et les calendriers agricoles. Ainsi, chaque couvert végétal (naturel ou anthropique) peut être représenté par la série temporelle d'indice de végétation qui lui est associée. En conséquence, ces séries s'avèrent utiles pour discriminer les formations végétales et les cultures à travers l'application de méthodes de classifications.

Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation se décomposent en cinq étapes. Premièrement, les séries temporelles moyennes de chaque classe de végétation sont étudiées pour déterminer si elles correspondent aux cycles végétatifs observés sur le terrain et valider ainsi la pertinence de leur utilisation. Deuxièmement, bien que la méthode CV-MVC soit appliquée pour réduire le bruit présent dans les séries journalières de MODIS/TERRA EVI, les compositions de 16 jours sont fréquemment affectées par des erreurs liées à la couverture nuageuse, à des défauts de transmission, des mauvaises corrections atmosphériques ou à l'effet bidirectionnel (Viovy *et al.*, 1992 ; Swets *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2004; Ma et Veroustraete, 2006). Pour ces raisons, il est nécessaire d'appliquer un algorithme de lissage des séries pour améliorer la différenciation inter-classes. Troisièmement, si les conditions d'acquisition des données sont bonnes, il se peut que trop de données soient disponibles pour effectuer la classification. Il faut donc considérer que des images contenant peu d'informations discriminantes sur la séparabilité des classes peuvent faire baisser la précision de la classification. Ce phénomène est connu comme l'effet de Hughes (Van Niel *et al.*, 2005). Il est donc nécessaire de réduire la dimensionnalité du jeu de données à travers une méthode de sélection ou d'extraction de variables. Quatrièmement, ces variables sont reprises pour réaliser la classification. Il existe divers algorithmes de classification couramment employés en télédétection qui permettent de classer les séries temporelles d'indices de végétation. Enfin, un traitement post-classification est effectué pour améliorer les résultats de la classification par pixel. Ce traitement peut être appliqué en adoptant des règles de transition interannuelles ou des segmentations qui ont pour but d'éliminer l'effet « sel-et-poivre » de la classification par pixel.

La classification de séries temporelles d'indice de végétation est donc un exercice long et rigoureux comprenant de nombreuses étapes précisément décrites dans ce chapitre.

2. Présentation des séries temporelles d'indice de végétation

Avant de présenter les méthodes de classification des séries temporelles de végétation, il est essentiel de comprendre ce que représentent ces séries. L'évolution des indices de végétation au cours d'une année correspond aux cycles phénologiques observés au sol. La figure 2.7 illustre le cas d'un pixel correspondant à une parcelle agricole semée en double culture (soja+maïs). L'année considérée ici s'étend du mois d'août au mois de juillet de l'année suivante.

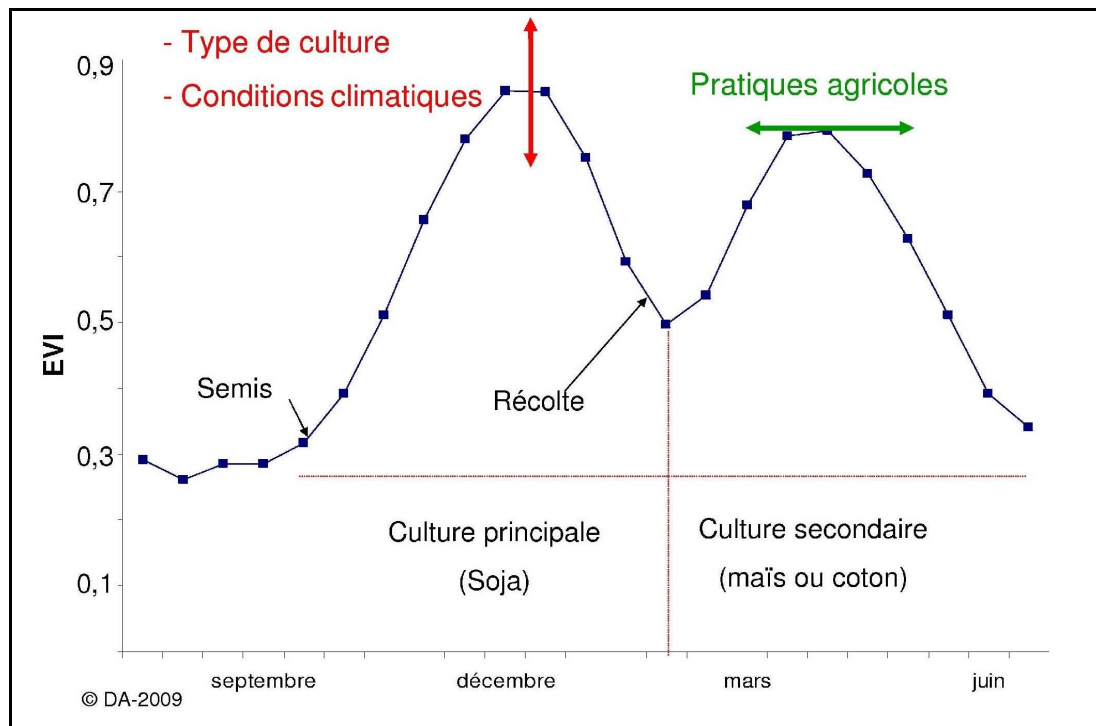


Figure 2.7 : Modèle de série temporelle de EVI d'un pixel extrait d'une parcelle agricole semée en double culture.

Du mois de juillet au mois de septembre, les valeurs d'indice de végétation sont faibles (environ 0,3 : ces valeurs sont comparables à ceux obtenus par Galford *et al.*, (2008) au Rondonia mais légèrement supérieures à ceux obtenus par Wardlow *et al.* (2007) aux Etats-Unis). Cette époque de l'année correspond à la saison sèche pendant laquelle les parcelles agricoles sont simplement recouvertes de résidus végétaux. A partir du mois de septembre, les agriculteurs sèment le soja. Au fur et à mesure que les plantes se développent, les valeurs de EVI augmentent jusqu'à atteindre des valeurs maximales (environ 0,8) au mois de décembre (ces valeurs confirment la capacité du EVI à saturer plus tardivement que le NDVI dont les valeurs maximales atteignent environ 0,9 ; Huete *et al.*, 2002). Ce mois correspond à la fin de la phase végétative du soja et au début de la phase de sénescence. A partir de ce moment, la phase reproductive est marquée par une diminution progressive de l'activité chlorophyllienne qui se poursuit jusqu'à la récolte du mois de février. La culture du maïs est alors semée à la suite du soja. Cela se traduit par un deuxième pic dans la série temporelle de EVI. A partir de février, les valeurs remontent pour atteindre un maximum en avril-mai. La phase de sénescence suivante est de nouveau caractérisée par une chute de EVI jusqu'à la récolte du maïs en saison sèche (juin-juillet). Enfin, après cette récolte, les valeurs se stabilisent de nouveau à 0,3 jusqu'au semis du soja de l'année suivante.

Même si l'aspect général des séries temporelles d'une même classe est reconnaissable, les valeurs de EVI témoignent d'une forte variabilité intra-classe. Par exemple, les décalages de séries temporelles dans le temps (variabilité horizontale) correspondent à des pratiques culturelles différentes qui peuvent se traduire par des dates de semis légèrement différentes. La variabilité dans les valeurs de EVI (variabilité verticale) peuvent quant à elles s'expliquer par des conditions sur le terrain (maladies, climat) plus ou moins propices au développement de la plante.

De plus, toutes les mesures d'indices de végétation sont affectées par des erreurs qui peuvent être d'origines diverses (Ma et Veroustraete, 2006 ; Viovy *et al.*, 1992 ; Chen *et al.*, 2004 ; Swets *et al.*, 2002) :

- présence de nuages ;
- problèmes de transmission de données ;
- mauvaise correction atmosphérique des images ;
- effet bi-directionnel (BRDF).

Ces erreurs augmentent la forte variabilité intra-classe et ont pour conséquence de produire du bruit dans les séries temporelles, ce qui rend leur interprétation difficile. Cependant, ces séries temporelles sont importantes pour la détection de changements d'occupation du sol et des conditions de surface pour la végétation, il est donc nécessaire d'éliminer ces bruits en lissant les séries.

3. Présentation des algorithmes de lissage

Différentes techniques ont été testées et employées avec l'objectif de lisser les séries temporelles. Elles se basent notamment sur l'hypothèse que les bruits dans les séries peuvent se traduire par (Klisch *et al.*, 2006) :

- des chutes de valeurs dues aux nuages, aux ombres ou aux effets bidirectionnels ;
- des pics de valeurs dus à des erreurs de transmission ou des mauvais paramètres d'angles de prise de vue.

Le type de bruit le plus fréquent est lié aux chutes de valeurs de l'indice de végétation. De ce fait, la plupart des méthodes développées tentent de réduire ces bruits en priorité. La première méthode présentée, le Maximum Value Composite (MVC), a été introduite par Holben (1986). Elle consiste à considérer comme acceptable la mesure maximale de l'indice de végétation à un pas de temps donné. Cette méthode, initialement utilisée sur les données NOAA-AVHRR avec un pas de temps de 10 jours, a ensuite été appliquée sur d'autres données, comme les données MODIS (produit MOD13) par exemple (Huete *et al.*, 2002).

Cependant, le MVC n'élimine pas l'ensemble des bruits. D'autres méthodes ont été mises au point pour améliorer le lissage des séries temporelles d'indice de végétation. Ces différentes techniques sont rappelées ci-après (Chen *et al.*, 2004; Pettorelli *et al.*, 2005) :

- 1- Les méthodes d'ajustement basées sur les transformées de Fourier ou sur les fonctions polynomiales.
- 2- Les méthodes basées sur un seuillage.
- 3- Les méthodes d'ajustement basées sur des fonctions asymétriques et des régressions linéaires.

Les méthodes d'ajustement basées sur les transformées de Fourier ou sur les fonctions polynomiales.

Les méthodes basées sur les transformées de Fourier ou sur les fonctions polynomiales permettent d'effectuer les lissages les plus performants. Cependant, elles entraînent des pertes d'informations en ne conservant pas suffisamment les valeurs d'indices de végétation considérées comme correctes (Ma et Veroustraete, 2006). Ce défaut génère des difficultés pour recréer la réponse saisonnière de l'indice de végétation (Pettorelli *et al.*, 2005). Par

ailleurs, l'utilisation de ces fonctions implique de considérer une certaine symétrie dans la saisonnalité des couverts végétaux (Chen *et al.*, 2004). Or, cette symétrie ne se retrouve pas toujours comme par exemple dans le cas des cultures (comme le montre la figure 2.7 au paragraphe précédent). Jonsson et Eklundh (2002) ont tenté d'ajuster la courbe à une fonction gaussienne asymétrique. Cette méthode donne des résultats cohérents, cependant, il est compliqué de repérer les données de maximum et minimum auxquelles les fonctions locales peuvent être ajustées (Chen *et al.*, 2004). Savitzky et Golay (1964) ont proposé un filtre inspiré des fonctions polynomiales. Celui-ci découle d'une application dans le domaine médical, toutefois il a été repris avec succès en télédétection par Chen *et al.* (2004). Ces derniers l'ont appliqué pour lisser des séries temporelles d'indice de végétation issues de SPOT-VEGETATION, NOAA-AVHRR ou MODIS. Ce filtre permet de lisser une série de résultats par simple convolution avec des coefficients correspondant au degré du polynôme d'interpolation choisi¹. La convolution peut être comprise comme une fenêtre mobile pondérée par des valeurs permettant un lissage par un polynôme de degré n (Chen *et al.*, 2004). Les différents poids correspondant aux différentes fenêtres d'études sont décrits dans l'article de Savitzky-Golay (1964).

Les méthodes basées sur un seuillage.

Parmi les méthodes de seuillage, le Best Index Slope Extraction (BISE) proposé par Viovy *et al.* (1992) est couramment utilisé. Cette méthode se base sur la prise en considération de la pente entre deux points successifs. Si cette pente décroît, le deuxième point est conservé à la condition qu'il n'existe pas de point au dessus d'un seuil pendant une certaine période fixée au préalable (généralement fixé à 120% de la valeur la plus basse repérée). Cette méthode a été construite afin de servir d'alternative à la méthode MVC pour le lissage de profils temporels NOAA-AVHRR au pas de temps journalier (Viovy *et al.*, 1992). Dans le cadre de cette thèse, cette méthode a été adaptée en modifiant les fenêtres d'étude et les valeurs de seuillage afin d'être utilisée à une résolution temporelle plus élevée. L'inconvénient du BISE est de se baser sur deux paramètres (période de temps et seuil d'acceptation) qui découlent d'analyses subjectives et dépendent donc des compétences et de l'expérience de l'expert (Chen *et al.*, 2004). Par ailleurs, les résultats semblent décaler légèrement les augmentations d'indice de végétation (Swets *et al.* 2002). Ce point pose évidemment problème lorsqu'il s'agit d'étudier un calendrier agricole. Un autre désavantage de cette méthode est qu'elle va éliminer des périodes avec plusieurs valeurs faibles successives (selon le pas de temps utilisé). Or, dans le cas de cultures et notamment de double cultures, des suites de faibles valeurs ne sont pas toujours dues à des erreurs (périodes d'intercultures par exemple).

Une autre technique basée sur un seuillage s'intitule le Mean-Value Iteration (MVI) présentée par Ma et Veroustraete (2006). Il s'agit ici de calculer la différence Δ entre l'indice de végétation à la date t et la moyenne m entre l'indice de végétation de la date $t+1$ et de la date $t-1$. Après avoir considéré tous les Δ , si le maximum Δ est supérieur à un certain seuil, la valeur de l'indice est remplacée par la moyenne m déjà calculée. Cette opération est réitérée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de Δ supérieur au seuil. Du fait de l'utilisation d'un seuil, cette méthode pose aussi le problème de sa détermination.

Les méthodes d'ajustement basées sur des fonctions asymétriques et des régressions linéaires.

¹ http://pagesperso-orange.fr/robert.mellet/regrs/regrs_06.htm

En ce qui concerne les méthodes basées sur des fonctions asymétriques et des régressions linéaires, Swets *et al.* (2002) proposent d'employer la méthode Weighted Least Squares (WLS). Il s'agit d'utiliser une fenêtre mobile de 5 périodes (de 16 jours dans notre cas) pour calculer les droites de régression à chaque point (la fenêtre se déplaçant de période en période). Cinq valeurs associées à cinq régressions sont ainsi obtenues pour chaque point. Une simple moyenne de ces valeurs fournit une estimation de la valeur de l'indice de végétation en un point donné. Par ailleurs, l'hypothèse selon laquelle les chutes d'indice de végétation correspondent aux bruits les plus fréquents est prise en compte. En effet, des poids sont attribués à chaque point lors du calcul des régressions. Ces poids sont fixés d'après la valeur du point par rapport au point suivant et au point précédent. Pettorelli *et al.* (2005) considèrent cette approche peu efficace dans le cas où plusieurs faibles valeurs successives sont détectées. Ainsi, il est déconseillé de l'utiliser pour l'étude de séries au pas de temps journalier qui sont plus bruitées. Par contre, elle peut s'avérer efficace à une résolution temporelle supérieure.

Validation du lissage des séries temporelles d'indice de végétation

Pour valider la qualité du lissage des différents modèles, Klisch *et al.* (2006) proposent quatre critères qui vont servir de base pour ces tests :

- 1- Les bruits ayant une haute fréquence doivent être diminués au plus haut degré possible.
- 2- Les attributs propres à chaque site doivent être conservés (nombre de modes...).
- 3- Les valeurs les plus hautes doivent être retenues si possible car les faux pics d'indice de végétation sont considérés comme rares.
- 4- La temporalité des profils doit être conservée, i. e. les dates de début/fin de cycle ne doivent pas être influencées.

Par ailleurs, Klisch *et al.* (2006) précisent que chaque modèle ne peut être analysé que sur une base visuelle. Un certain degré de subjectivité est donc intégré à cette étape. Pour valider statistiquement le choix de la méthode de lissage, les résultats obtenus sont comparés à l'étape suivante du processus de classification pour définitivement choisir une méthode.

4. Sélection ou extraction des attributs des séries temporelles d'indices de végétation

Les séries annuelles d'indices de végétation utilisées pour la classification se composent de 23 images MODIS. La classification de ces séries se base donc sur un jeu de données d'une grande dimension. Or, Van Niel *et al.* (2005) et Bruzzone *et al.* (2000) affirment que la qualité d'une classification n'est pas forcément améliorée en intégrant un grand nombre de variables en entrées. Ce phénomène, appelé peaking, est plus connu en télédétection sous la dénomination de « effet de Hughes ». Il s'explique par une mauvaise (ou du moins peu fiable) estimation des fonctions de densité de probabilité de chaque classe à partir des données de terrain. Ceci peut être lié au fait que trop de variables sont utilisées par rapport à la taille des échantillons (Van Niel *et al.*, 2005). De manière générale, ces auteurs estiment que le nombre d'échantillons doit être d'au moins 10 à 30 fois le nombre de variables.

Pour s'affranchir de cet effet de Hughes, il faut réduire la dimensionnalité des données d'entrée afin de trouver une combinaison optimale. Plusieurs techniques existent pour réduire

la dimensionnalité d'un jeu de données multivariées. Celles-ci sont classées en deux catégories par Bruzzone *et al.* (2000) :

- *Feature selection* : il s'agit de sélectionner un sous-ensemble de variables permettant d'optimiser la classification ;
- *Feature extraction* : il s'agit d'extraire certains attributs à partir des profils temporels de EVI qui vont permettre de compresser l'information à partir de transformations linéaires ou non linéaires et ainsi d'optimiser les résultats finaux.

Feature extraction

La technique d'extraction d'attributs la plus utilisée est celle de l'Analyse en Composantes Principales. Elle permet de résumer l'information contenue dans les données multivariées (23 variables dans ce cas) en quelques composantes principales non corrélées entre elles. Le problème ici est qu'il devient difficile de comprendre quels sont les réels paramètres physiques mis en jeu pour séparer les classes lors de la classification (Bruzzone *et al.*, 2000). Il est également possible d'extraire d'autres attributs à partir des séries temporelles d'indice de végétation. Ainsi, Galford *et al.* (2008) effectuent une classification à partir de l'écart-type des séries temporelles d'indices de végétation de chaque classe. Jonathan (2005) extrait quant à lui 13 attributs généraux et 10 attributs propres à chaque mode (cycle phénologique) du profil temporel. Morton *et al.* (2006) proposent 36 attributs pour définir les mêmes séries temporelles : minimum, maximum, moyenne, médiane, amplitude, et écart-type des séries temporelles de NDVI et EVI mesurées sur l'année entière, la saison humide et la saison sèche.

Feature selection

En ce qui concerne la sélection de variables, elle présente l'intérêt majeur de permettre une meilleure compréhension des processus sous-jacents à la production des données, i. e. une meilleure compréhension des processus physiques permettant l'amélioration de la classification (Guyon et Elisseeff, 2003). La sélection de variables peut être réalisée à partir de deux techniques : les *wrapper methods* ou les *filter methods* (Kohavi et John, 1997). Les *wrapper methods* évaluent la performance de chaque sous-ensemble de variables possible, ce qui les rend parfois très demandeuses en ressources informatiques (Cantu-Paz *et al.*, 2004). L'évaluation est réalisée directement à partir des résultats obtenus par un classificateur déterminé au préalable pour différents sous-ensembles de variables (Jonathan, 2005).

Les *filter methods* ont l'avantage d'être plus rapides que les *wrapper methods* (Guyon et Elisseeff, 2003). Elles sont indépendantes du classificateur employé et sélectionnent les variables à partir de l'hypothèse qu'un lot optimal de variables doit produire la meilleure séparabilité entre classes (Cantu-Paz *et al.*, 2004). La problématique de la sélection de variables consiste à éliminer les informations redondantes (les variables corrélées entre elles) sans affecter la qualité de la classification. La complexité de cette tâche est illustrée par Guyon et Elisseeff (2003) selon lesquels : « selecting the most relevant variables is usually suboptimal for building a predictor, particularly if the variables are redundant. Conversely, a subset of useful variables may exclude many redundant but relevant variables ». Ces mêmes auteurs ajoutent que : « Noise reduction and consequently better class separation may be obtained by adding variables that are presumably redundant » et « very high variable correlation does not mean absence of variable complementarity » (Guyon et Elisseeff, 2003).

Ainsi, l'intégration de deux variables corrélées (deux images à deux dates successives par exemple) peut s'avérer bénéfique pour la classification.

Pour appliquer une *filter method*, il faut se baser sur une fonction de critères (Swain et King, 1973) afin de filtrer les variables à sélectionner. Celle-ci peut être définie par la mesure d'une distance de séparabilité telle que l'indicateur J_{ave} issu du calcul des distances de séparabilité par la méthode de Jeffries-Matusita (Swain et King, 1973 ; Bruzzone *et al.*, 2000, Cantu-Paz *et al.*, 2004) (cf. encadré). Cet indicateur mesure le potentiel de chaque variable pour discriminer les classes recherchées. Une fois calculé pour chaque variable, il suffit de trier les valeurs de cet indicateur selon un ordre décroissant. La création des sous-ensembles optimaux de variables se fait en incorporant une à une et de manière ordonnée les variables (Guyon et Elisseeff, 2003). Cette *filter method* est souvent considérée comme optimale de par ses faibles demandes en ressources informatiques et sa robustesse statistique (Guyon et Elisseeff, 2003). Pour valider la meilleure combinaison de variables, l'indicateur J_{ave} peut une nouvelle fois servir de référence. La combinaison permettant d'optimiser la valeur de J_{ave} est celle dont on peut espérer obtenir des meilleurs résultats lors de la classification. Toutefois, cette combinaison optimale n'est pas simple à déterminer car l'indice J_{ave} continue de croître au fur et à mesure que l'on rajoute des variables. Il doit tout de même atteindre un plateau qui permette d'estimer la combinaison optimale. De plus, comme le précisent Thomas *et al.* (1987) : « *any final assessment of the accuracy of a classification rests upon the classification process itself and not directly upon the separability index selection of appropriate channels* ». Ainsi, ce sont bien les résultats des tests de classification qui permettent de déterminer définitivement la meilleure combinaison de variables. Les résultats issus de cette étape de sélection/extraction de variables sont donc validés en phase de classification.

Les tests de séparabilité

Les tests de séparabilité sont des méthodes statistiques indiquant le potentiel de discrimination entre différentes classes d'une même base de données multivariées. Ces tests sont employés pour réaliser une première évaluation des possibilités de discrimination entre classes et déterminer si il existe un sous-ensemble de variables permettant d'optimiser le résultat final de la classification.

Il existe plusieurs tests pour étudier la séparabilité entre classes: distance euclidienne, distance de Mahalanobis, divergence, divergence transformée, distance de Bhattacharyya et distance de Jeffries-Matusita (Thomas *et al.*, 1987). Les deux premières méthodes sont les plus rudimentaires et plus efficaces pour l'étude de la séparabilité sur une seule variable. Pour une étude basée sur des données multivariées, ces méthodes ne sont donc pas adaptées. La divergence est présentée comme inadéquate par Swain et King (1973) lorsque la séparabilité entre classes est très variable (i.e. quand la séparabilité entre chaque paire de classes varie considérablement). Des tests comparatifs ont été réalisés entre les différentes méthodes et mettent régulièrement en avant les bons résultats obtenus par la distance de Jeffries-Matusita (Swain et King, 1973 ; Thomas *et al.*, 1987; Bruzzone *et al.*, 2000 ; Van Niel *et al.*, 2005 ; Wardlow *et al.*, 2007). Ce test se base sur l'hypothèse que les données de chaque classe pour chaque variable peuvent être représentées par des fonctions de densité de probabilité gaussiennes. Ainsi, les classes sont définies par deux paramètres statistiques que sont la moyenne et l'écart-type (ou la variance). Selon ces paramètres, deux classes sont alors plus ou moins proches, tout en sachant qu'il peut exister un espace de chevauchement entre les deux fonctions (figure 2.8). Le principe du test est alors d'essayer de mesurer cette aire de chevauchement commune aux deux fonctions en supposant que plus cette aire est petite

(grande), plus la séparabilité est élevée (faible) (Thomas *et al.*, 1987). Ce cas simple, valable pour un test sur une seule variable, peut être appliqué sur plusieurs variables en intégrant les vecteurs moyens et une matrice de variance-covariance. Le test de Jeffries-Matusita (JM) fournit alors une valeur comprise entre 0 et 2 qui indique une mesure générale de la séparabilité entre deux classes basée sur la distance moyenne entre les fonctions de probabilités de ces classes (Wardlow *et al.*, 2007). Le calcul de cette distance est le suivant :

$$JM = 2(1 - e^{-B})$$

où :

$$B = \frac{1}{8} D^2 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\left| \frac{\sum_j + \sum_k}{2} \right|}{\sqrt{|\sum_j| |\sum_k|}} \right)$$

et

$$D^2 = (\mu_j - \mu_k)^T \left(\frac{\sum_j + \sum_k}{2} \right)^{-1} (\mu_j - \mu_k).$$

μ_j et μ_k correspondent aux valeurs de EVI attendues de chaque classe, et \sum_j et \sum_k sont des estimations non biaisées des matrices de covariances de chaque classe (Wardlow *et al.*, 2007).

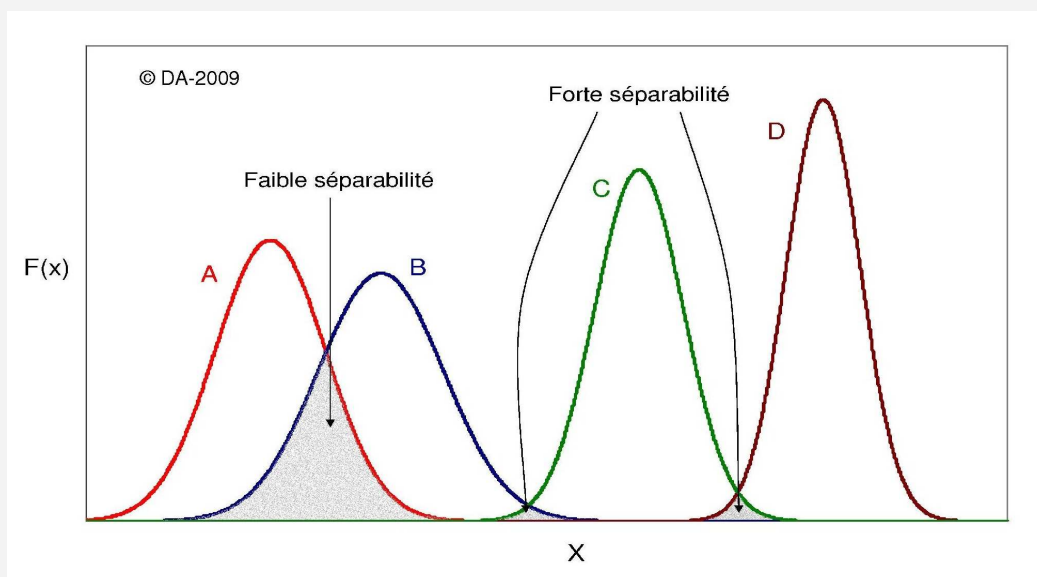


Figure 2.8 : Présentation du principe des tests de séparabilité entre 4 classes A, B, C et D. Les classes A et B sont faiblement séparables. La classe C est fortement séparable des classes B et D. Il n'y a pas de confusion possible entre les paires de classes A-C, A-D et B-D.

Ces tests ont pour but d'identifier la séparabilité entre paires de classes pour un certain nombre de bandes testées (Thomas *et al.*, 1987), i. e. différentes dates MODIS dans notre cas. Cependant, ils ne permettent pas de se faire une opinion générale sur la séparabilité entre toutes les classes. Pour cela, il a été proposé de dériver des indicateurs globaux de séparabilité à partir des tests effectués. Ceux-ci sont présentés par Swain et King (1973), Thomas *et al.* (1987) et Bruzzone *et al.* (2000). Ils consistent à calculer les moyennes des distances de

séparabilité pondérées par les probabilités à priori des différentes classes. Ainsi, dans le cas du test de Jeffries-Matusita, un indice moyen intitulé J_{ave} est dérivé à partir de la formule suivante :

$$J_{ave} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m JM_{ij}$$

où JM_{ij} est la distance de Jeffries-Matusita entre les classes i et j (Swain et King, 1973)

Cet indicateur permet d'estimer le potentiel de séparabilité de toutes les classes pour chaque variable pour combinaison de variables. Il peut donc être employé pour détecter les variables apportant le plus d'information dans la classification.

5. Choix d'un algorithme de classification

Les variables sélectionnées ou les attributs extraits sont employés en tant que données d'entrée de classifications supervisées. Il existe divers algorithmes permettant de réaliser des classifications supervisées en télédétection. Les classificateurs peuvent être classés en 3 catégories principales (South et al, 2004) :

- Les algorithmes basés sur les distances ;
- Les algorithmes basés sur les probabilités ;
- Les algorithmes basés sur les angles spectraux.

Dans cette étude, trois algorithmes correspondant à ces trois catégories sont testés :

- la classification en arbre de décision (AD), algorithme basé sur les distances;
- la classification par maximum de vraisemblance (ML), algorithme basé sur les probabilités;
- la classification par Spectral Angle Mapper (SAM), algorithme basé sur les angles spectraux.

Les arbres de décision

Rakotomalala (2005) montre que cette classification tente « d'expliquer et prédire la valeur prise par une variable à prédire catégorielle, dite attribut de classe ; à partir d'une série de variables, dites variables descriptives ». Les arbres sont composés de sommets, de branches et de feuilles. Les sommets correspondent aux variables sur lesquelles les tests sont effectués (la racine étant la première variable testée). Ces tests permettent de partitionner les échantillons à partir d'un critère appliqué sur les variables. Chaque partitionnement représente alors une branche de l'arbre. Les niveaux de partitionnement peuvent se succéder jusqu'à parvenir à la détection de feuilles regroupant les observations ayant des caractéristiques se rapprochant.

La construction de tout arbre de décision doit répondre à 4 questions (Rakotomalala, 2005) :

- 1- Quelles sont les variables de segmentation à choisir parmi toutes les variables disponibles ?

- 2- Comment fixer le critère de segmentation à appliquer à chaque variable dans le cas de variables continues et comment déterminer un seuil permettant de séparer au mieux un échantillon ?
- 3- Quelle taille optimale pour l'arbre de décision ? Dans la plupart des cas, il est impossible d'obtenir des feuilles pures (avec 100% des observations appartenant à la même classe).
- 4- Dans le cas de feuilles impures (avec plusieurs classes représentées), quelle règle de décision appliquer pour attribuer une classe aux observations des différentes feuilles ?

Il existe divers algorithmes d'arbres de décision permettant d'apporter des réponses à ces questions (Quinlan, 1996 ; Rakotomalala, 2005). Dans cette étude, l'algorithme CHAID¹ Improved est retenu car il présente l'avantage d'être particulièrement efficace lorsque la taille de la base de données est importante (Rakotomalala, 2005).

La méthode du CHAID a été présentée à l'origine par Kass (1980). L'idée est de sélectionner les meilleures variables de segmentation à intégrer successivement dans l'arbre à partir d'un indicateur de qualité. Celui-ci est basé sur la mesure du Khi-2 d'écart à l'indépendance (Rakotomalala, 2005). Cette version a par la suite été améliorée en normalisant cet indicateur par le test de Tschuprow. L'indice de Tschuprow se définit par la formule suivante :

$$t = \frac{\chi^2}{n\sqrt{(K-1)(L-1)}}$$

où :

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{\left(n_{kl} - \frac{n_{k.} \times n_{.l}}{n} \right)^2}{\frac{n_{k.} \times n_{.l}}{n}}$$

avec K = nombre de classes ; L = nombre de modalités descriptives (ici 23 images MODIS par an) et n_{kl} est le nombre d'observations de la variable/image l correspondant à la classe k (Rakotomalala, 2005).

Cette amélioration est particulièrement intéressante lorsque les variables descriptives sont très disparates. Une fois la variable choisie, il faut déterminer le seuil de segmentation binaire. Le même test de Tschuprow est réemployé. Les données sont triées et tous les seuils possibles entre deux variables sont testés. Une mesure du test permet alors d'évaluer la qualité de partitionnement et de sélectionner le seuil optimal. La question de la taille de l'arbre se pose ensuite. En effet, plus la base de données est grande et plus l'arbre a tendance à s'agrandir. Or, la qualité de la classification ne s'améliore pas forcément avec des arbres trop grands. La méthode du CHAID propose donc de fixer une valeur seuil du test de Tschuprow au-dessous de laquelle la construction de l'arbre est stoppée (On parle de pré-élagage). Enfin, lors de l'attribution de la classe à la feuille finale, la règle la plus simple consiste à se baser sur la majorité, i.e. on attribue la classe de celle qui est la plus représentée dans la feuille.

Le Maximum de vraisemblance

¹ CHAID : Chi-squared Automatic Interaction Detector

L'algorithme du Maximum de Vraisemblance s'appuie sur des notions de probabilités et deux conditions sur les données d'entraînement sont posées pour son application (Thomas *et al.*, 1987) :

- Pour chaque bande, la fonction de probabilité de chaque classe doit s'approcher d'une loi normale.
- Il est conseillé de disposer d'échantillons pour chaque classe qui soient 10 à 100 fois supérieurs au nombre de bandes (Thomas *et al.*, 1987).

Lorsque ces deux conditions sont validées, il faut considérer les fonctions de probabilité dans un espace à n -dimensions. Pour cela, les paramètres de moyenne et d'écart-type pris en compte pour chacune des bandes et chacune des classes sont étudiés sous forme de vecteur moyen et de matrice de covariance pour chaque classe dans l'ensemble des bandes (Lillesand et Kiefer, 1987). Les fonctions de densité de probabilité sont alors calculées. Elles permettent d'établir la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe. La classification consiste à attribuer au pixel la classe dont la probabilité d'appartenance est la plus élevée. Cette particularité est surtout intéressante lorsqu'il existe un espace de chevauchement entre les fonctions de densité de probabilité. Le fait de connaître la probabilité d'un pixel inclus dans cet espace d'appartenir à une classe permet des traitements post-classification qui améliorent la qualité de la classification.

Le classificateur en Maximum de Vraisemblance (ML) est un des algorithmes de classification supervisée le plus couramment utilisé en télédétection. Cependant, il présente quelques limites liées à l'hypothèse de normalité des classes dans chacune des bandes. Selon Lillesand et Kiefer (1987), « this assumption of normality is generally reasonable for common spectral response distributions. » Au contraire, pour Sohn et Rebello (2002), « multispectral satellite image data rarely show normal distributions. » Ce point est donc critiquable. Par ailleurs, l'hypothèse de normalité implique que la distribution des données à chaque date et pour chaque classe soit unimodale (Thomas *et al.*, 1987). Or ceci n'est pas forcément le cas. Par exemple dans cette étude, différentes pratiques culturales au sein d'une même classe peuvent entraîner des distributions bimodales (ex : un semis de coton précédé de millet ou pas). Enfin, lorsque la variance au sein des données d'entraînement d'une même classe est trop élevée, la classification par Maximum de Vraisemblance peut être déficiente. Or, la variance au sein des classes choisies peut être élevée pour une même date. Ceci peut s'expliquer notamment par les calendriers agricoles variables qui sont appliqués sur le terrain. Par exemple, le semis de soja peut s'étaler sur plusieurs mois entraînant des décalages dans les valeurs d'indice de végétation et donc une forte variance.

Le Spectral Angle Mapper

Le classificateur Spectral Angle Mapper (SAM) est également testé dans le cadre de cette étude. Le principe se base sur deux hypothèses (Sohn et Rebello, 2002) :

- La similarité spectrale entre deux spectres peut être mesurée en terme de « forme » spectrale à partir de « distance angulaire ».

- Le fait que les spectres de deux objets similaires soient caractérisés par de faibles variations linéaires dues à des effets atmosphériques et topographiques permet l'utilisation de la « distance angulaire » dans l'espace multivarié pour la classification.

En fait, alors que les classificateurs traditionnels se basent sur la distribution statistique des données, le SAM étudie la « forme » spectrale des classes (Sohn et Rebello, 2002). Il s'agit de calculer un angle θ entre deux vecteurs dans un espace multivarié¹. Ces deux vecteurs correspondent d'une part au vecteur moyen d'une classe d'entraînement, et, d'autre part, au vecteur représentant un pixel à classer. Cet angle est calculé pour chaque pixel par rapport à chaque classe d'intérêt. Plus la valeur de l'angle θ entre une classe et un pixel est faible, plus la probabilité du pixel d'appartenir à cette classe est forte (South *et al.*, 2004) (fig. 2.9).

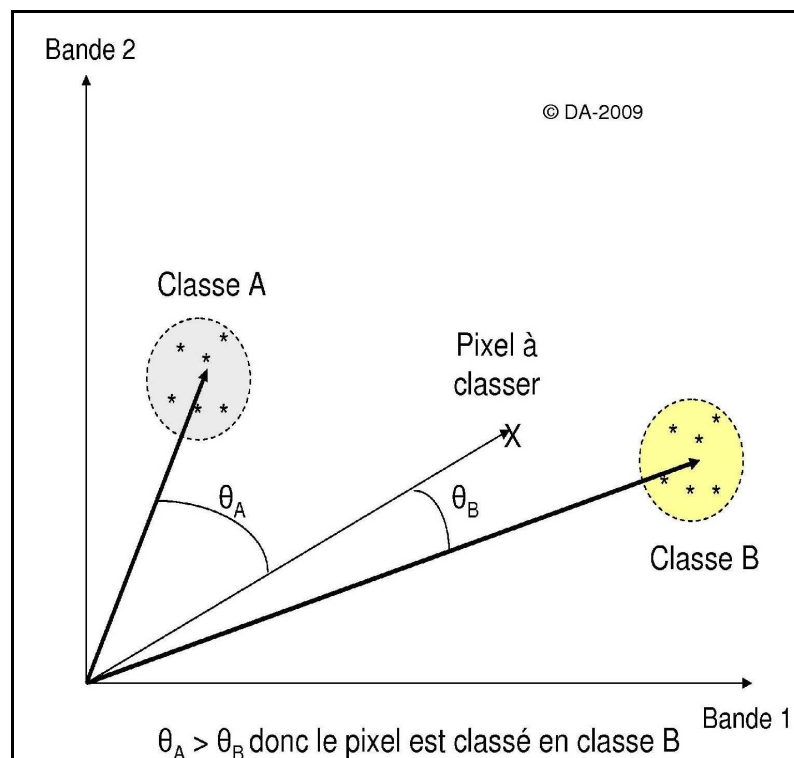


Figure 2.9 : Illustration du principe du classificateur Spectral Angle Mapper

La mesure de l'angle θ est calculée par l'équation :

$$\cos \theta_{r,t} = \frac{V_r^T V_t}{\|V_r\| \|V_t\|}$$

où V_r est le vecteur EVI de référence et V_t est le vecteur EVI de chaque pixel des images d'entraînement.

Le fait que l'algorithme SAM ne soit pas lié à la distribution statistique des données d'entraînement lui procure un avantage par rapport au classificateur par Maximum de Vraisemblance. En effet, cela permet de s'affranchir de l'hypothèse de distribution normale des classes. De par son indépendance à la distribution statistique des données, le SAM se

¹ South *et al.* (2004) emploient l'algorithme CAC (Cosine of the Angle Concept) qui présente l'avantage de prendre en compte à la fois l'angle et la longueur des vecteurs.

présente comme un algorithme robuste. Il est moins sensible aux variations inter-annuelles d'indices de végétation dues à la variabilité des conditions météorologiques (Rembold et Maselli, 2006). Ce dernier point est important dans le cadre de cette étude puisque les classifications doivent être appliquées sur 7 années.

Tous ces types de classificateurs ont déjà été utilisés avec l'objectif de cartographier des couverts végétaux ou des pratiques culturales : voir South *et al.*, (2004), Rembold et Maselli (2006) pour le Spectral Angle Mapper ; Doraiswamy *et al.* (2007a) et Wardlow et Egbert (2008) pour les arbres de décision ; Jonathan (2005) pour le maximum de vraisemblance. Tous ces auteurs ont obtenu des résultats validant l'utilisation de ces algorithmes pour des thématiques agricoles. Cependant, quelque soit le classificateur choisi, les classifications par pixels se montrent limitées lorsque deux classes ont une faible séparabilité. Une forte confusion entre classes se traduit sur l'image par un effet sel-et-poivre (Lillesand et Kiefer, 1987). Des pixels isolés peuvent être mal classés et les éliminer permet alors d'améliorer sensiblement la classification.

6. Amélioration de la classification

Selon Lunetta *et al.*, (1991), différentes méthodes post-classification sont applicables pour améliorer les classifications par pixel : les méthodes spatiales et les méthodes thématiques. Les méthodes thématiques consistent à regrouper des classes pour recréer de nouvelles catégories. Les méthodes spatiales consistent à lisser la classification pour enlever l'effet « sel-et-poivre » (« salt-and-pepper ») lié aux mauvaises classifications de pixels isolés (Lunetta *et al.*, 1991). Parmi les méthodes spatiales, deux techniques sont couramment employées : les filtres et les approches orienté-objets.

6.1. Les filtres

Les filtres peuvent supprimer efficacement les pixels isolés mal classés en faisant passer une fenêtre mobile de taille variable sur tous les pixels de l'image. La classe majoritaire dans la fenêtre est alors attribuée au pixel central (Lillesand et Kiefer, 1987).

Une autre forme de filtre consiste à déclasser des pixels ou groupes de pixels dont les caractéristiques ne sont pas plausibles selon le sujet étudié. Dans le cadre de cette thèse, deux hypothèses sont posées pour déterminer ces caractéristiques :

1. Une première hypothèse concerne la taille des groupes de pixels. Par exemple, dans le cas de l'agriculture mécanisée extensive au Mato Grosso, des parcelles agricoles d'une superficie inférieure à 25 ha (4 pixels MODIS) sont presque inexistantes (Morton *et al.*, 2006)¹. Les groupes de pixels isolés détectés en surface agricole et dont la superficie est inférieure à 25 ha sont donc éliminés des classes agricoles.

2. Une seconde hypothèse pour l'application d'un filtre est liée à l'évolution temporelle de l'occupation du sol sur un pixel. Certaines transitions d'une année à l'autre sont impossibles et doivent donc être corrigées. Par exemple, on peut émettre l'hypothèse qu'il ne peut pas y avoir plus d'un changement d'occupation du sol en trois ans. Il est en effet peu probable qu'une parcelle défrichée une année pour être cultivée l'année suivante soit

¹ Les parcelles inférieures à 25 ha représentent 1,4% des 1890 parcelles cartographiées pendant les missions de terrain, et ces parcelles ne sont pas isolées.

abandonnée après un an d'exploitation. De la même manière, une parcelle cultivée est difficilement abandonnée une année avant d'être de nouveau cultivée. La détection et la correction de telles situations aberrantes permettent donc d'améliorer la classification.

6.2. Les approches orientées-objets

Les analyses orientées-objets peuvent également être employées pour éliminer les pixels isolés (Blaschke et Strobl, 2001; Oruc *et al.*, 2004; Meinel and Neubert, 2004) car elles sont basées sur les caractéristiques de segments, régions ou objets repérés au sein d'une image. Une certaine proportion du signal provenant de la surface au sol représentant un pixel sur l'image provient en fait des pixels voisins (Blaschke et Strobl, 2001). Ainsi, classifier des ensembles de pixels devient souvent plus efficace que classifier chaque pixel individuellement.

Les approches orientées-objets sont couramment employées avec des données à haute résolution spatiale (Landsat, Ikonos, Quickbird). Par exemple, Fritz *et al.* (2008) améliorent les résultats de la classification des cultures obtenus à partir de séries temporelles MODIS NDVI en segmentant une image Landsat. Une classe unique déterminée par les séries temporelles de MODIS NDVI est attribuée à chaque segment, ce qui élimine l'effet « sel-et-poivre ». Cependant, appliquer une telle méthodologie à l'échelle du Mato Grosso nécessiterait des ressources informatiques très importantes. Il faudrait segmenter tous les ans toutes les images Landsat couvrant le Mato Grosso. Nous avons donc choisi d'appliquer cette approche directement à partir des données MODIS. De telles approches orientées-objets effectuées avec des données moyennes résolutions sont plus rares. Santos *et al.* (2006) ont comparé des classifications orientées-objets et orientées-pixels réalisées à partir de données ENVISAT-MERIS (Résolution spatiale = 300 m). Leur objectif était de cartographier l'occupation du sol au Portugal. Les résultats de la classification orientée-objets se sont avérés moins bons que ceux obtenus par la classification par pixel. Ces mauvais résultats peuvent être expliqués par la forte hétérogénéité des couverts végétaux présents dans l'espace étudié. En effet, dans une région aux couverts plus homogènes comme le Mato Grosso, Rodriguez-Yi *et al.* (2000) et Anderson (2004) ont appliqué une même approche avec succès à partir de données NOAA-AVHRR et MODIS, respectivement. Puisque les échelles spatiales considérées dans cette étude sont également petites¹, il s'avère intéressant de tester l'apport éventuel d'une approche orientée-objets pour l'amélioration de la cartographie des cultures.

Ces approches sont réalisées en deux étapes : (i) la segmentation et (ii) l'attribution d'une classe aux objets.

La segmentation permet de regrouper les pixels par régions selon des critères de similarité tels que la valeur du pixel ou la texture (Meinel et Neubert, 2004). Différents algorithmes ont été proposés pour réaliser les segmentations et ont été implémentés sur divers logiciels tels que eCognition ou SPRING (entre autres). Meinel et Neubert (2004) comparent ces différents logiciels à partir d'une image haute-résolution IKONOS. Ils concluent que l'algorithme proposé par eCognition (Definiens Developer ©) est le plus efficace. Ce logiciel est utilisé dans le cadre de cette thèse même si des résultats obtenus à partir de données IKONOS ne sont pas forcément valables pour les données MODIS. L'algorithme de segmentation proposé par ce logiciel est un algorithme par accroissement de régions (Bins *et al.*, 1996). Ce type d'algorithme est choisi car il prête plus attention à l'homogénéité interne des objets qu'à la distinction entre objets voisins (au contraire des algorithmes de

¹La superficie moyenne des parcelles est de 177 ha d'après les données récoltées sur le terrain.

segmentation *watershed* par exemple ; Beucher et Meyer, 1993). Le principe de l'algorithme par accroissement de régions consiste à déterminer un pixel initial et à étendre la région en incluant ou non les pixels connexes. Ces pixels sont assimilés si la variation d'un critère prédéterminé par rapport à la moyenne de l'objet considéré est inférieure à un seuil fixé. Plusieurs critères peuvent être fixés sous eCognition. Le premier s'appelle « *Scale Parameter* » et détermine l'écart-type maximal d'hétérogénéité autorisé dans une région. Cette mesure d'hétérogénéité est basée sur d'autres sous-critères : la forme (elle-même déterminée par son aspect compact et son lissage) et la couleur. Les paramètres « forme » et « couleur » sont testés et une attention particulière est portée au facteur « *Scale parameter* » influant sur la taille des objets segmentés. Dans cette étude, la segmentation se fait en incluant plusieurs images issues de la phase de *feature selection*. Ainsi, chaque image correspond à une date et la segmentation peut donc être perçue comme une *segmentation temporelle* dont le but est d'identifier des régions homogènes par leurs séries temporelles de EVI.

Une fois la segmentation réalisée, il faut attribuer une classe à chaque segment détecté. Pour cela, la méthode la plus classique (fig.2.10) consiste à calculer les valeurs moyennes au sein de chaque objet et à appliquer un algorithme de classification classique tel que le Maximum de Vraisemblance déjà présenté. Dans notre cas, ces valeurs moyennes correspondent à des comportements phénologiques moyens au sein d'un objet. Cependant, cette méthodologie peut s'avérer inappropriée pour les segmentations issues de données moyennes résolutions car :

- Des pixels dont les séries temporelles sont bruitées ou mixtes peuvent influencer de manière exagérée la valeur moyenne mesurée pour chaque objet.
- L'hétérogénéité entre objets est moins élevée, ce qui uniformise les séries temporelles moyennes de chaque objet et complique donc la classification.

Pour ces raisons, une nouvelle méthode d'attribution des classes aux objets est proposée. Elle consiste à évaluer chaque pixel au sein des objets selon leurs probabilités *a posteriori* d'appartenance à chaque classe d'utilisation du sol. En effet, des plus grandes probabilités *a posteriori* d'appartenir à une classe sont corrélées avec des meilleurs niveaux de fiabilité dans les classifications finales (Jonathan, 2005). Donc, donner la priorité aux pixels classifiés de manière plus sûre devrait permettre d'optimiser l'attribution des classes aux objets. La moyenne des probabilités calculée pour tous les objets et toutes les classes donne une indication sur la probabilité d'un objet d'appartenir à chaque classe. La classe présentant la plus grande probabilité est alors désignée comme étant la classe de l'objet. De cette manière, l'influence des pixels dont les probabilités *a posteriori* sont faibles (i.e. des pixels dont les séries temporelles sont atypiques ou bruitées) est minimisée dans l'évaluation finale de la classe de chaque objet.

Pour s'assurer de la validité de cette nouvelle méthode, elle sera comparée avec la méthode classique d'attribution des classes. Ces deux méthodes sont présentées en figure 2.10.

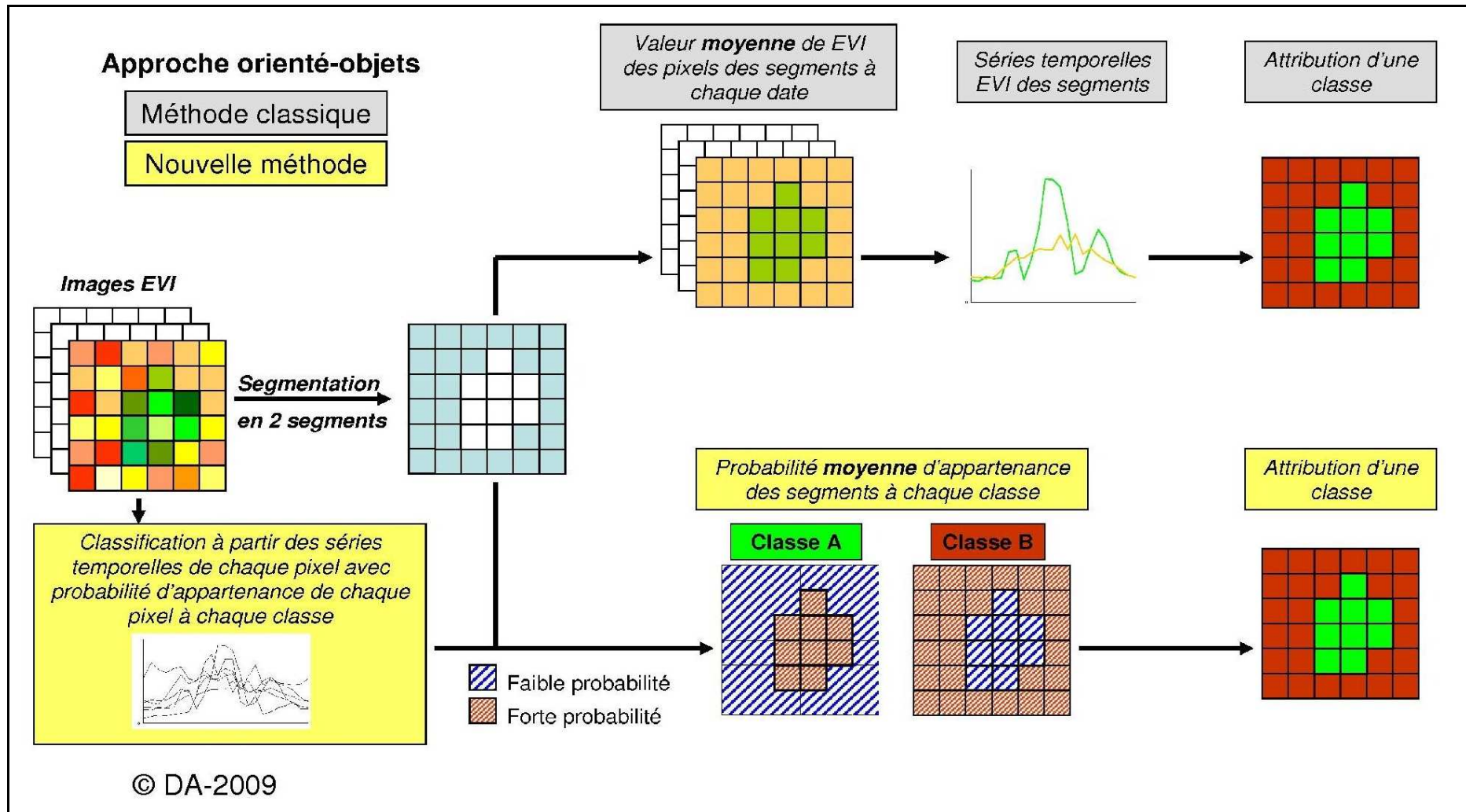


Figure 2.10 : Présentation de l'approche orientée-objets par la méthode classique et la nouvelle méthode proposée. La différence réside dans le mode d'attribution d'une classe à un segment.

7. Validation de la classification

Chaque étape d'une étude de télédétection (acquisition, conversion, traitement, classification des données) est source d'erreur potentielle. Ces erreurs s'accumulent au cours de ces étapes de manière additive ou multiplicative (Lunetta *et al.*, 1991). Idéalement, une estimation des erreurs est réalisée après toutes les étapes mais les ressources en temps permettent rarement d'acquérir une telle précision (Lunetta *et al.*, 1991). Les classifications sont donc généralement validées en phase finale à partir de l'étude de matrices de confusion. Ces matrices sont des tableaux carrés qui expriment le nombre de pixels assignés à une classe particulière par rapport aux pixels de cette même catégorie qui ont été effectivement collectés sur le terrain (Story et Congalton, 1986). Cependant, Congalton (1991) précise que valider une classification à partir de tous les pixels de chaque classe entraîne des problèmes d'autocorrélation spatiale positive qui biaise la qualité de validation : « *These results¹ are explainable in an agricultural environment where field sizes are large and typical misclassification would be to make an error in labeling the entire field* ». Il est alors préférable de baser la classification sur des échantillons de pixels. Dans cette thèse, 100 pixels de chacune des classes d'utilisation du sol sont aléatoirement choisis selon les recommandations de Congalton (1988) et Congalton (1991).

Deux indices issus des matrices de confusion permettent d'évaluer la qualité de la classification : la précision totale et l'indice de Kappa proposé par Congalton et al (1983).

La précision totale (O.A. : *Overall Accuracy*) est le rapport entre le nombre de pixels correctement classés et le nombre total de pixels à classer. Une valeur minimale de O.A. communément admise pour valider une classification est de 85% (Foody, 2002) Cependant, ce même auteur précise que la valeur de O.A. à atteindre varie selon la classification. En fait, cet objectif à atteindre est fonction de la nature des images utilisées, du nombre de classes déterminées, de la taille des échantillons ainsi que des besoins de l'utilisateur (Foody, 2006).

L'indice de Kappa a pour but de compenser le fait que même une classification entièrement aléatoire entraînerait un certain pourcentage de pixels correctement classés (Lillesand et Kiefer, 1987). Il exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard (Congalton *et al.*, 1983). Par exemple, un Kappa de 0,75 exprime que la classification utilisée évite 75% des erreurs obtenues par une procédure travaillant totalement au hasard (Girard et Girard, 1999).

Par ailleurs, la matrice de confusion permet l'étude de la précision par classes. Celle-ci peut alors révéler les confusions interclasses qui peuvent être résolues en intégrant d'autres informations discriminatoires (Foody, 2002). L'analyse des classes se base sur les erreurs de commission et d'omission. Les erreurs de commission correspondent aux pixels ayant été mal classifiés par le classificateur. Les erreurs d'omission correspondent aux pixels ayant été omis d'une classe par le classificateur. A partir de ces deux mesures d'erreur, il est possible de déterminer la précision pour l'utilisateur (User's Accuracy) et pour le réalisateur (Producer's Accuracy) (Story et Congalton, 1986). La précision pour l'utilisateur est le pourcentage de pixels d'une classe de la classification correctement classés vis-à-vis de la référence (100% - erreurs de commission). La précision pour le réalisateur est le pourcentage de pixels d'une

¹ Ici « *results* » fait référence à une auto-corrélation positive.

classe de référence correctement classés par télédétection (100% - erreurs d'omission) (Girard et Girard, 1999). Une classe est considérée comme étant correctement détectée par la classification lorsque les indices User's Accuracy et Producer's Accuracy sont supérieurs à 70% (Foody, 2002).

Les indicateurs classiques tels que le O.A. ou l'indice de Kappa sont cependant critiquables. Foody (2002) présente certains problèmes liés à leur utilisation. Ces indices ne sont par exemple pas optimaux pour des classifications à échelle régionale ou globale à partir de données basses résolutions incluant de nombreux pixels mixtes. Ils sont également dépendants de la qualité des données d'entraînement et de tests récoltées sur le terrain (ces données sont souvent choisies dans des régions aux paysages homogènes et tendent ainsi à surestimer la qualité de la classification). Enfin, l'indice de Kappa n'est pas idéal pour comparer deux classifications entre elles. South *et al.* (2004), Foody (2004) et Foody (2006) utilisent alors le test de Mc Nemar (ou Z-test) pour comparer deux classifications. Ce test fonctionne lorsqu'un même échantillon de données de terrain est utilisé pour valider les classifications. Il évalue la significativité statistique à 5% de la différence entre deux classifications. Le calcul de ce test se base sur une matrice de contingence 2x2 indiquant les concordances et discordances entre les deux classificateurs (tableau 2.2) (Foody, 2006).

		Classification 1 (C1)	
		A = Pixels correctement classés par C1 et C2	B = Pixels mal classés par C1 et correctement classés par C2
Classification (C2)	2	C = Pixels correctement classés par C1 et mal classés par C2	D = Pixels mal classés par C1 et C2

Tableau 2.2 : Exemple de matrice de contingence servant à la réalisation du test de Mc Nemar.

A partir de ce tableau, la formule du test de Mc Nemar est:

$$z = \frac{B - C}{\sqrt{B + C}}$$

Deux classifications sont considérées comme significativement différentes avec une marge d'erreur de 5% lorsque $z \geq |1,96|$.

8. Conclusion

Les séries temporelles d'indices de végétation (EVI) permettent le suivi de l'activité végétative dans le temps. Etant donné que les couverts végétaux ont des cycles phénologiques et/ou une activité végétative différenciés, ces séries temporelles présentent un potentiel intéressant pour la discrimination des couverts végétaux, qu'ils soient naturels ou anthropisés.

Toutefois, la classification de séries temporelles est un exercice complexe qui nécessite de nombreux pré-traitements et post-traitements. Dans cette thèse, nous proposons d'effectuer la classification en cinq étapes. La première étape (1) consiste simplement à observer les séries temporelles de EVI de chacune des classes cartographiées sur le terrain. Cette étape permet simplement de valider qualitativement le potentiel des données utilisées

pour séparer les classes de végétation considérées. La deuxième étape (2) vise à améliorer la qualité des séries temporelles de EVI en appliquant un algorithme de lissage. Il s'agit ici de réduire le bruit lié à des conditions particulières de prises de vues (présence de nuages notamment) qui peut affecter la qualité de la classification. La troisième étape (3) a pour but de réduire la dimensionnalité du jeu de données qui peut être volumineux en fonction du nombre d'images composant la série temporelle. Cette phase peut se réaliser en extrayant des attributs des séries temporelles (moyenne, minimum, maximum de la série temporelle par exemple) ou en sélectionnant des images à des périodes où la séparabilité entre classes est importante. (4) Les images extraites ou sélectionnées sont alors intégrées dans le processus de classification supervisée. Différents algorithmes de classification sont testés. (5) Le résultat de la classification peut alors être amélioré en appliquant des contraintes particulières sur les classes obtenues (règles de transition entre années, superficie minimale d'une classe par exemple) ou en intégrant le résultat dans une méthode de classification orientée-objet. Finalement, la classification est validée à partir des données collectées lors des missions de terrain. L'indice de Kappa est notamment utilisé pour valider la qualité des résultats.

Cette méthodologie est alors testée au Mato Grosso afin de cartographier les surfaces agricoles et les pratiques culturales dans le but ultérieur de suivre l'évolution des territoires du soja.

Chapitre 7. Application de la méthodologie pour la cartographie des surfaces agricoles au Mato Grosso

1. Introduction

L'étude de la dynamique du soja au Mato Grosso vise à vérifier deux hypothèses concernant l'expansion des cultures de soja et l'intensification agricole au cours des années 2000. La vérification de ces hypothèses implique de cartographier les couverts végétaux au Mato Grosso. Nous avons vu au chapitre précédent que les séries temporelles d'indices de végétation sont des données efficaces pour répondre à cette problématique. Elles sont utilisées dans le cadre d'un processus de classification. Ce processus supervisé nécessite de posséder des données d'entraînement et de validation collectées sur le terrain. Celles-ci sont présentées dans la première partie de ce chapitre. A partir de ces données et des images MODIS TERRA/EVI, deux classifications successives sont effectuées. Dans un premier temps, nous cherchons à discriminer les surfaces agricoles des autres couverts végétaux. Cela permet de quantifier l'expansion agricole entre deux dates. Dans un second temps, nous différencions les cultures et les pratiques agricoles adoptées au sein des surfaces agricoles. Les cartes de cultures permettent alors d'analyser la tendance à l'intensification agricole sur la période. Pour la réalisation de ces deux classifications, une méthodologie reprenant les cinq étapes présentées au chapitre précédent est appliquée et validée.

2. Présentation des données utilisées pour la classification

2.1. Les données de terrain

La réalisation d'une classification supervisée impose de disposer de données d'entraînement et de contrôle satisfaisantes en terme qualitatif et quantitatif. La collecte de données sur le terrain représente donc une étape importante du processus de classification. Dans le cadre de cette étude, trois missions de terrain ont été réalisées en 2006, 2007 et 2008 dans les communes situées le long de la route BR163 et dans la Chapada dos Parecis. Au total, 14 communes ont été visitées (figure 2.11).

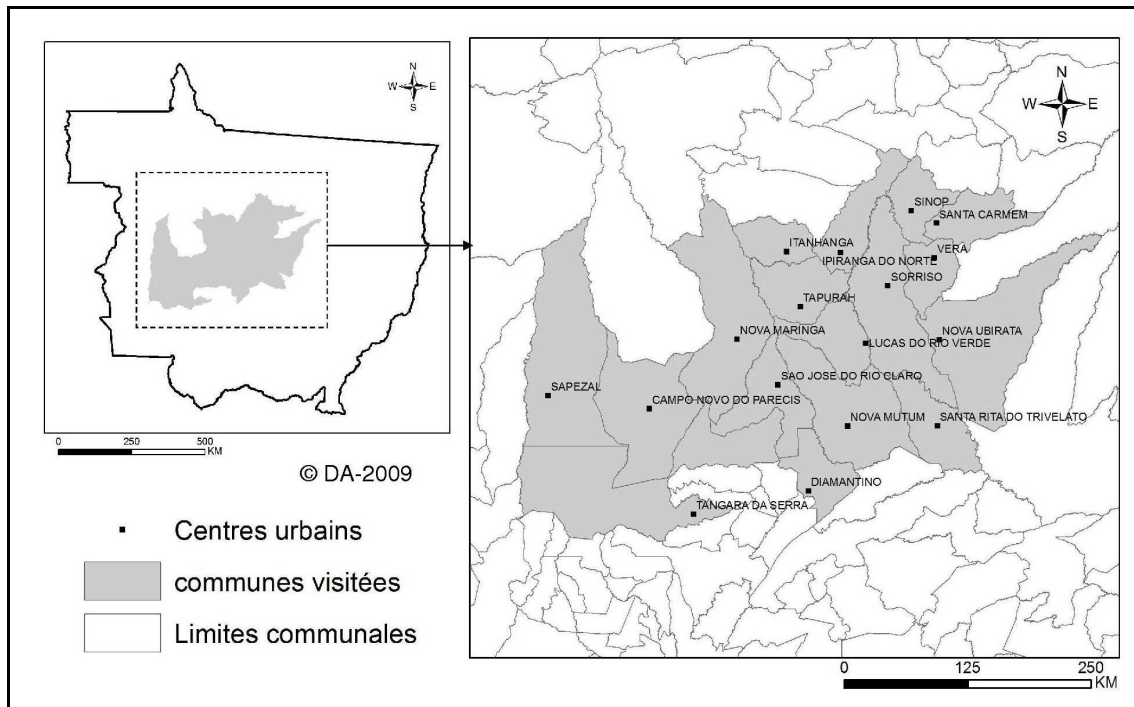


Figure 2.11 : Communes visitées lors des différentes missions de terrain réalisées.

Les données de terrain ont été récoltées à partir d’entretiens avec des producteurs agricoles dans plus de 50 fazendas. Lors de ces entretiens, les producteurs ont fourni des cartes de leurs fazendas qui ont ensuite été repérées sur des images CBERS-CCD récentes (année en cours ou précédente) afin de pouvoir recréer des cartes numériques géoréférencées (figure 2.12). Lorsque les producteurs ne disposaient d’aucune carte en format papier, celles-ci étaient directement numérisées sur les images CBERS-CCD en se fiant aux connaissances des personnes rencontrées. Il existe donc une forme d’incertitude sur la qualité des données qui peut entraîner un léger biais lors de la classification.

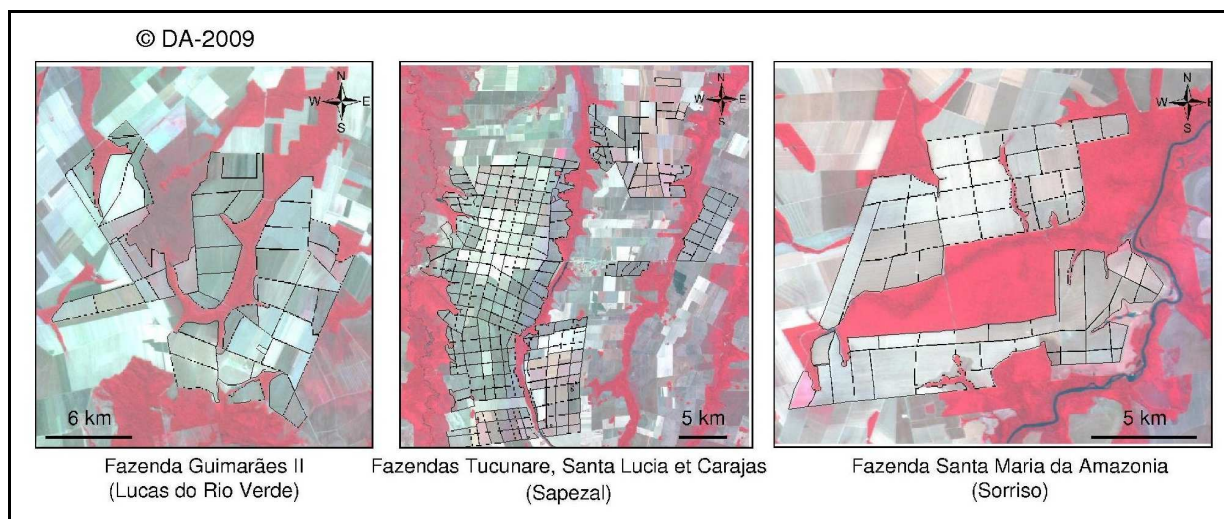


Figure 2.12 : Exemples de fazendas visitées à Lucas do Rio Verde, Sapezal et Sorriso et cartographiées à partir d’images CBERS-CCD et de données fournies par les producteurs.

Les informations collectées concernent surtout les cultures semées et les rendements¹. Ces informations sont obtenues auprès des fazendeiros lorsque ceux-ci sont présents ou auprès des ouvriers agricoles (*gerentes*). Deux sources d'incertitudes spatio-temporelles sont liées à ces données :

- Incertitude spatiale : il est difficile pour les enquêtés de se rappeler avec précision des cultures semées dans chaque parcelle lorsque les fazendas comprennent régulièrement plus d'une vingtaine de parcelles ;

- Incertitude temporelle : les données des récoltes les plus récentes sont les mieux renseignées. Il est en effet compliqué pour les personnes interrogées de se souvenir des cultures semées dans chaque parcelle à chaque récolte. De plus, les ouvriers agricoles changent régulièrement de fazendas². En conséquence, il est souvent compliqué d'obtenir des données historiques auprès de personnes ayant intégré l'entreprise récemment.

Cependant, certaines fazendas réalisent un suivi informatisé disposant de toutes les données historiques au niveau parcellaire. L'accès à ces données informatiques dépend du degré de coopération du producteur et du pouvoir de conviction de l'enquêteur. Ces informations ont été obtenues pour 16 fazendas et sont particulièrement importantes car elles permettent d'améliorer sensiblement et rapidement la base de données.

Au total, 50 fazendas ont été visitées au Mato Grosso (figure 2.13) et treize types d'utilisation du sol ont été rencontrés (tableau 2.3) : « soja », « soja+maïs », « soja+coton », « soja+millet », « soja+sorgho », « coton », « canne à sucre », « intégration culture-élevage », « riz », « pivot d'irrigation », « pâturage », « eucalyptus » et « autres³ ». Toutes ces classes n'ont pas le même intérêt pour la classification dont l'objectif est de détecter les principales cultures commerciales semées au Mato Grosso (soja, maïs, coton) et certaines pratiques culturales (système de production en simple ou double cultures). De plus, certaines classes ne sont pas assez représentées pour être incluses dans la classification. Pour ces raisons, seules six classes sont retenues pour la suite de l'étude : « soja », « soja+millet », « soja+sorgho », « soja+maïs », « soja+coton » et « coton ». Ces classes ont été retenues car elles sont représentatives⁴ des pratiques agricoles du Mato Grosso. Malgré tout, les classes non considérées seront brièvement présentées car elles peuvent faire l'objet de recherches intéressantes à l'avenir.

¹ Dans le cadre du programme Duramaz, nous avons aussi récolté des données sur la biographie et le niveau de vie des producteurs.

² Ces changements peuvent intervenir dans le cadre de mutations dans d'autres fazendas du même producteur (ou de la même entreprise agricole) mais, il existe surtout un marché des ouvriers agricoles dynamique, ce qui est caractéristique des frontières agricoles.

³ La classe « autres » correspond à des parcelles isolées de haricots ou de tournesol.

⁴ Ces six classes représentent plus de 90% des surfaces cartographiées à partir des enquêtes de terrain en 2005-2006.

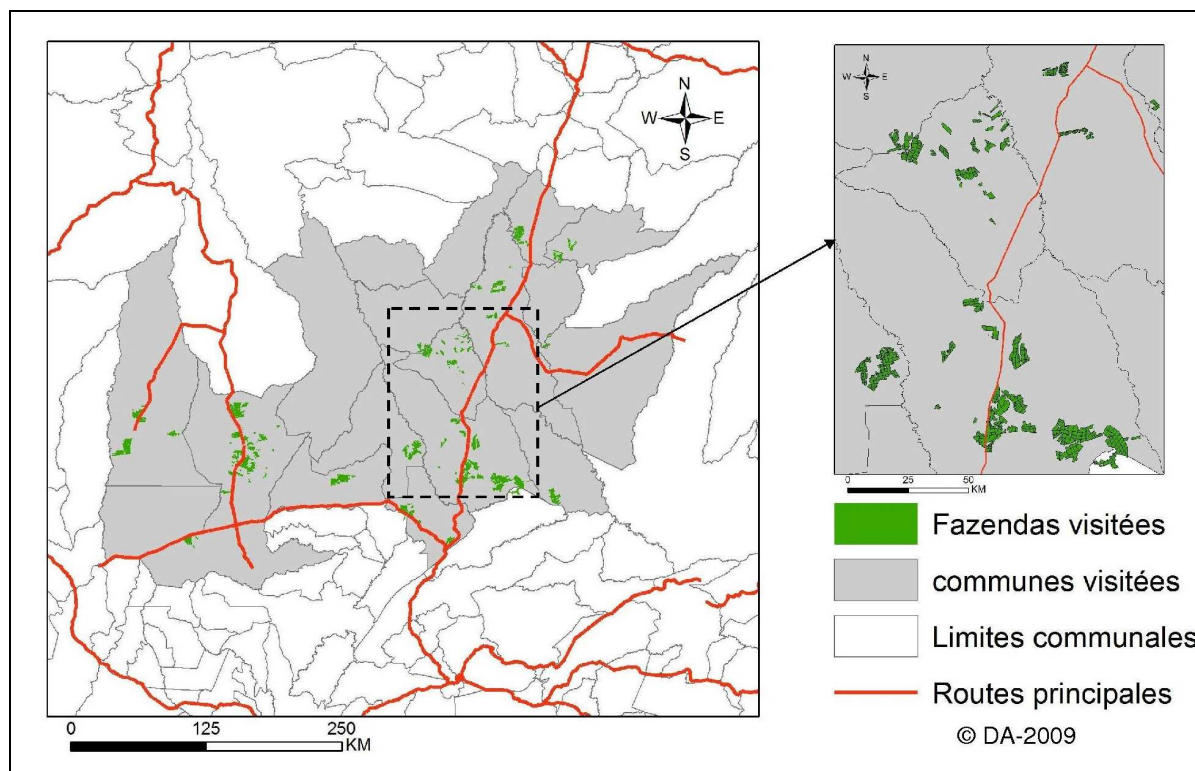


Figure 2.13 : Localisation des fazendas visitées au Mato Grosso lors des diverses missions de terrain.

Classes	2005-2006		2006-2007	
	Nombre de parcelles	hectares	Nombre de parcelles	hectares
Soja	96	15068	48	7838
Soja+millet	227	31475	146	21098
Soja+maïs	139	26021	361	60933
Intégration culture-élevage	6	660	28	2822
Soja+coton	114	21149	209	41341
Coton	39	7472	104	19510
Canne à sucre	-	-	-	31463 ¹
Riz	6	559	7	872
Irrigation²	1	106	2	240
pâturage	40	9985	24	4911
eucalyptus	4	636	7	923
Autres	3	620	5	1112
Soja+sorgho	6	1211	28	5121
Total	681	114962	969	198184

Tableau 2.3 : Bilan des classes repérées sur le terrain et cartographiées.

2.2. Les données IBGE

La collecte de données agricoles fiables dans un territoire aussi grand que le Brésil et en mutation constante est une tâche complexe. L'IBGE (Institut Brésilien de Géographie et Statistiques) fournit annuellement des statistiques agricoles à l'échelle municipale. Celles-ci

¹ Les parcelles de canne à sucre sont réparties dans une trentaine de fazendas à Campo Novo do Parecis. Elles ont une superficie moyenne de 50 ha. Leur nombre exact n'a pas été calculé dans le cadre de cette thèse.

² L'irrigation est effectuée par des pivots circulaires de plusieurs centaines de mètres.

sont calculées depuis 1990 à travers le programme PAM (Produção Agrícola Municipal) et sont disponibles sur le site internet de l'IBGE¹. Les statistiques recherchées recensent la superficie semée et récoltée, la production, le rendement moyen et le prix moyen payé au producteur pour diverses cultures dont, entre autres, le soja, le coton, le maïs (IBGE, 2002). Les données sont collectées par des agents disposant de contacts avec des acteurs locaux de la filière agricole (IBGE, 2002). Cette méthode peut donc induire un biais dans les résultats selon les agents travaillant dans chaque commune. Ainsi, même si ces données sont les plus couramment utilisées, il convient de conserver un regard critique sur les variables recensées et leur qualité. Nous soulevons notamment trois points qui peuvent être source d'incertitudes : (i) le choix des acteurs locaux ; (ii) les limites administratives considérées et (iii) les variables recensées.

Le choix des acteurs locaux rencontrés dans chaque commune

Les secrétaires de l'agriculture de chaque commune sont parmi les premiers acteurs consultés sur le terrain par les agents de l'IBGE. Trois expériences personnelles vécues sur le terrain illustrent les difficultés d'obtenir des données fiables à partir de ces secrétaires.

- 1- A Sinop, en 2005, le secrétaire m'a conseillé d'aller voir les personnes de l'IBGE pour obtenir les statistiques agricole municipales... ce qui peut être surprenant si l'on considère que l'IBGE doit lui-même prendre l'avis du secrétaire pour faire ses estimations.
- 2- A Sorriso, le secrétariat de l'agriculture déclarait que 595 000 ha de soja étaient semés sur le territoire communal en 2003-2004. L'IBGE ne recensait que 547 000 ha. Les écarts sont donc importants... et pas seulement pour le soja. Le problème est le même pour le maïs. Alors que l'IBGE repérait 95 000 ha de maïs en 2005-2006, le président du syndicat des producteurs estimait quant à lui qu'il y avait 200 000 ha semés en 2008, soit une augmentation de plus de 100% en deux ans qui paraît peu plausible.
- 3- A Nova Mutum, lors d'un entretien avec le secrétaire de l'agriculture en 2005, celui-ci m'a énuméré les superficies semées chaque année depuis 2000 à partir d'une feuille volante tombée derrière une armoire sur laquelle il avait écrit au crayon à papier! Les superficies semées en soja étaient simplement réévaluées de 25 000 ou 50 000 ha tous les ans tandis que la production consistait à multiplier cette superficie par trois (étant donné que la productivité dans la région est estimée à 3 tonnes/ha).

Les limites administratives considérées

Parmi les acteurs locaux rencontrés par les agents de l'IBGE, les entreprises multinationales acheteuses de soja sont certainement celles disposant des données les plus fiables. Mais, les secteurs pris en considération par ces entreprises ne respectent pas les limites administratives. Par exemple, une part du soja ou du maïs géré par une entreprise de Sorriso provient en fait des communes voisines. Deux producteurs interrogés sur le terrain symbolisent bien cette situation. Tout d'abord, le président du Syndicat des producteurs de Sorriso est le représentant des producteurs de la commune alors que sa fazenda est située sur le territoire de la commune voisine de Vera. De même, le représentant de l'APROSOJA (Association des Producteurs de Soja) pour la région centre-nord est installé à Sorriso tandis

¹ sidra.ibge.gov.br

que sa fazenda se trouve à Ipiranga do Norte. On peut donc se poser la question de savoir comment l'IBGE parvient à différencier ces productions dans les statistiques municipales.

Par ailleurs, certaines communes ont été divisées au cours de la période d'étude. Leurs limites municipales ont donc changé. Par exemple, la commune de Santa Rita do Trivelato s'est séparée de Nova Mutum en 2002. La qualité des statistiques agricoles est alors liée à la capacité des agents de l'IBGE de différencier les productions de deux communes anciennement unies. Les possibilités d'analyses chronologiques pour ces communes sont également limitées puisque les valeurs attribuées à une même commune à deux années différentes ne correspondent pas au même territoire.

Les variables recensées

L'IBGE recense les surfaces agricoles de toutes les cultures (soja, coton, maïs, riz...) de manière séparée. Le total des surfaces agricoles est alors la somme des surfaces cultivées de chaque culture. Ainsi, ces calculs ne prennent pas en compte les pratiques culturales. Par exemple, une parcelle semée en soja en été et en coton en automne est en fait comptée deux fois. Ainsi, les surfaces totales cultivées ne correspondent pas aux surfaces agricoles. Pour la culture du maïs, la séparation entre le maïs semé en récolte principale ou secondaire n'est réalisée que depuis 2002.

Enfin, les superficies cultivées incluent les cultures semées par les grands et les petits producteurs. Or, la classification détecte difficilement les petites parcelles de par la résolution spatiale des images MODIS (1 pixel = 6,25 ha), ce qui peut expliquer certaines différences entre les résultats de la classification et les statistiques officielles.

Ainsi, les différentes critiques présentées mettent en avant la nécessité d'inclure une source de données objective dans les processus d'estimation des statistiques agricoles. Malgré tout, les données de l'IBGE restent les plus fiables et les plus complètes aujourd'hui. Elles sont donc utilisées dans cette thèse.

2.3. Les données MODIS

Les images MODIS/TERRA EVI (MOD13Q1-version 4) ont été téléchargées via internet¹. Les dates considérées vont de juillet 2000 (jour julien 209) à juillet 2008 (jour julien 193) afin de réaliser les classifications annuelles et d'analyser la dynamique agricole sur sept années (une année est centrée sur la saison des pluies pour ne pas couper les cycles végétatifs). Ainsi, 161 dates sont prises en compte (23 dates par an). Mais, dans un premier temps, la méthodologie de classification est testée à partir des données des années 2005-2006 et 2006-2007. Ce n'est qu'une fois la méthodologie validée que la classification est appliquée aux autres années.

Pour chaque date de la période d'étude, trois scènes sont sélectionnées (h12v10, h12v09 et h13v10). Ces scènes recouvrent 90% du territoire matogrossense (fig. 2.14). Les régions des extrémités nord-est et nord-ouest de l'Etat ne sont effectivement pas recouvertes. Il a été choisi de ne pas télécharger ces scènes car la filière agricole mécanisée est inexistante dans ces régions pour le moment.

¹ <http://edcdaac.usgs.gov>

Les images acquises au format HDF ont été prétraitées grâce au logiciel MRT (Modis Reprojection Tool) disponible gratuitement via internet¹. Cet outil permet (i) de mosaïquer les scènes et (ii) de projeter les images dans un système de coordonnées planes (UTM21S-WGS84) ou géographiques (latitude/longitude-WGS84). Pour chaque image, seules les données EVI sont conservées (les données NDVI sont écartées pour les raisons présentées au chapitre 1 de cette Partie).

La qualité des images a ensuite été vérifiée à l'aide de l'outil LDOPE (Land Data Operational Product Evaluation) disponible sur le même site internet². Cet outil permet d'évaluer la qualité de chaque pixel à partir d'un fichier image dénommé « Quality Assessment » contenu dans les fichiers HDF téléchargés. Les critères proposés par Jonathan (2005) sont repris pour juger de la qualité d'un pixel. Ils permettent de ne conserver que les pixels pour lesquels (i) l'EVI a été calculé, (ii) l'utilité de l'EVI est de niveau moyen ou supérieur, (iii) il n'y a pas une haute quantité d'aérosols, (iv) il n'y a pas de nuages et (v) et il n'y a pas d'ombre.

La figure 2.15 présente le nombre de pixels de qualité non satisfaisante obtenus pour l'année 2005-2006. Il apparaît qu'une grande partie du Mato Grosso (ouest et nord) est recouverte par plus de 10 pixels erronés sur les 23 qui composent une année. Ceci est dû au fait que, dans les régions tropicales telles que le Mato Grosso, la saison des pluies s'accompagne d'une couverture nuageuse dense et quasiment permanente. Pour ces raisons, les séries temporelles de EVI sont fortement bruitées et il est nécessaire de les améliorer en appliquant un algorithme de lissage.

¹ <http://igskmncnwb001.cr.usgs.gov/datatools.asp>

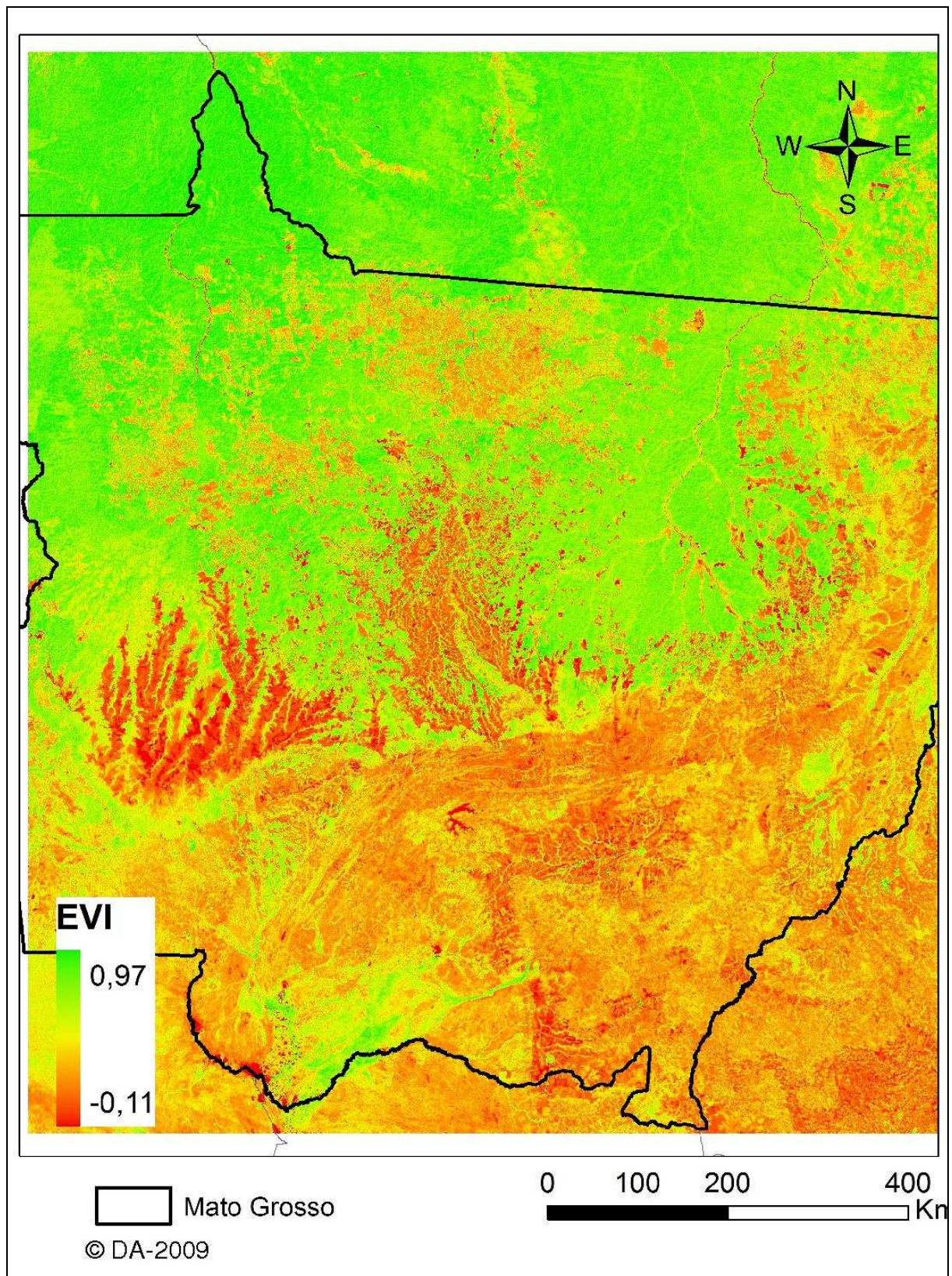


Figure 2.14 : Exemple d'image MODIS/TERRA EVI du Mato Grosso le 28 juillet 2005.

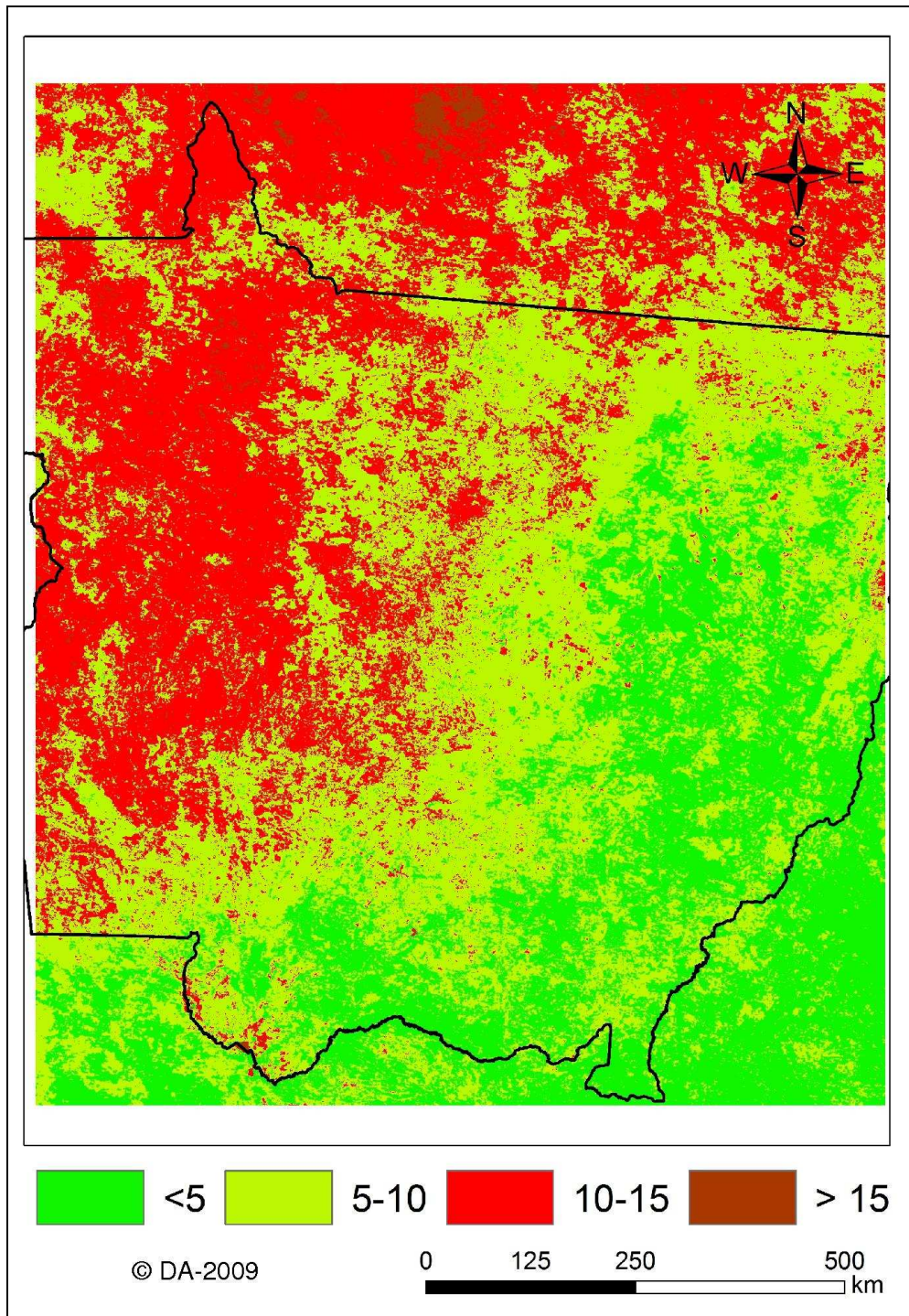


Figure 2.15 : Nombre de mesures jugées de qualité non satisfaisante par l’outil LDOPE entre juillet 2005 et juillet 2006. La valeur maximale est 23.

3. Détection des surfaces agricoles au Mato Grosso

La plupart des cartographies de l’occupation du sol incluent une classe agriculture. Au Mato Grosso, Anderson (2004), Jonathan (2005), Morton *et al.* (2006), Brown *et al.* (2007) ou encore Galford *et al.* (2008) ont appliqué des méthodologies permettant de repérer les surfaces agricoles à partir de données MODIS. Cette première classification s’inspire largement de ce qui a déjà été fait et est donc présentée de manière moins détaillée que la

classification des cultures. La méthodologie proposée par Jonathan (2005) est reprise et adaptée dans le cadre des liens créés durant cette thèse entre l'Embrapa Solos de Rio de Janeiro et le laboratoire COSTEL de l'Université de Rennes 2-Haute Bretagne.

Jonathan (2005) a implémenté une méthodologie ayant pour but de cartographier l'occupation du sol dans le bassin versant du Alto Taquari, au sud du Mato Grosso. Quatre types d'occupation du sol sont distingués : forêt, *cerrado*, pâturage et agriculture. Ces quatre classes sont reprises dans cette thèse même si seules les surfaces agricoles nous intéressent réellement.

Les données d'entraînement pour la classe agriculture sont celles présentées au début de ce chapitre. Les sites d'entraînement de la classe pâturage ont été repérés à partir d'images CBERS-CCD et de données de terrain. Enfin, les échantillons des classes forêt et *cerrado* sont choisis dans les aires protégées créées dans les biomes correspondants selon la carte de végétation du PRODEAGRO/SEMA-MT (cf. Partie 3 – Chapitre 1). Les classes forêt, *cerrado* et pâturages sont regroupées en fin de classification pour ne conserver qu'un masque des surfaces cultivées. Pour cette classification, l'année d'entraînement considérée est 2006-2007 et la validation est réalisée sur l'année 2005-2006.

La classification des séries temporelles de EVI reprend les cinq étapes proposées au chapitre précédent.

3.1. Analyse des séries temporelles de EVI

Les séries temporelles de EVI des quatre types d'occupation du sol retenus sont présentées en figure 2.16. La classe « agriculture » se distingue clairement des autres classes par deux modes correspondant aux systèmes de double culture. Le premier mode s'étendant d'octobre à février représente les cultures de soja. Le second mode correspond à une culture de maïs, coton, millet ou sorgho semée après la récolte du soja. La valeur maximale du second mode est moins élevée que pour le premier mode car le semis d'une deuxième culture n'est pas encore généralisé à l'échelle du Mato Grosso. Ainsi, ce mode correspond à la moyenne de valeurs de EVI mesurées sur des parcelles cultivées et non cultivées.

La série temporelle de la classe « forêt » est caractérisée par des hautes valeurs de EVI tout au long de l'année. Les valeurs restent élevées (entre 0,5 et 0,6) car l'activité chlorophyllienne se maintient tout au long de l'année (elles sont même légèrement plus élevées en saison sèche). Les classes « pâturage » et « *cerrado* » présentent des séries temporelles de EVI très proches avec des valeurs plus élevées en saison humide (environ 0,5). A partir du mois d'avril, la saison des pluies se termine instaurant un stress hydrique qui se traduit par une chute régulière du EVI. Les valeurs se maintiennent cependant légèrement supérieures (environ 0,3) à celles de la classe « agriculture » dont les sols sont généralement simplement couverts de résidus végétaux.

Dans l'ensemble, la figure met en avant le profil très différent de la classe « agriculture », ce qui indique que cette classe devrait être efficacement séparable des autres lors de la classification.

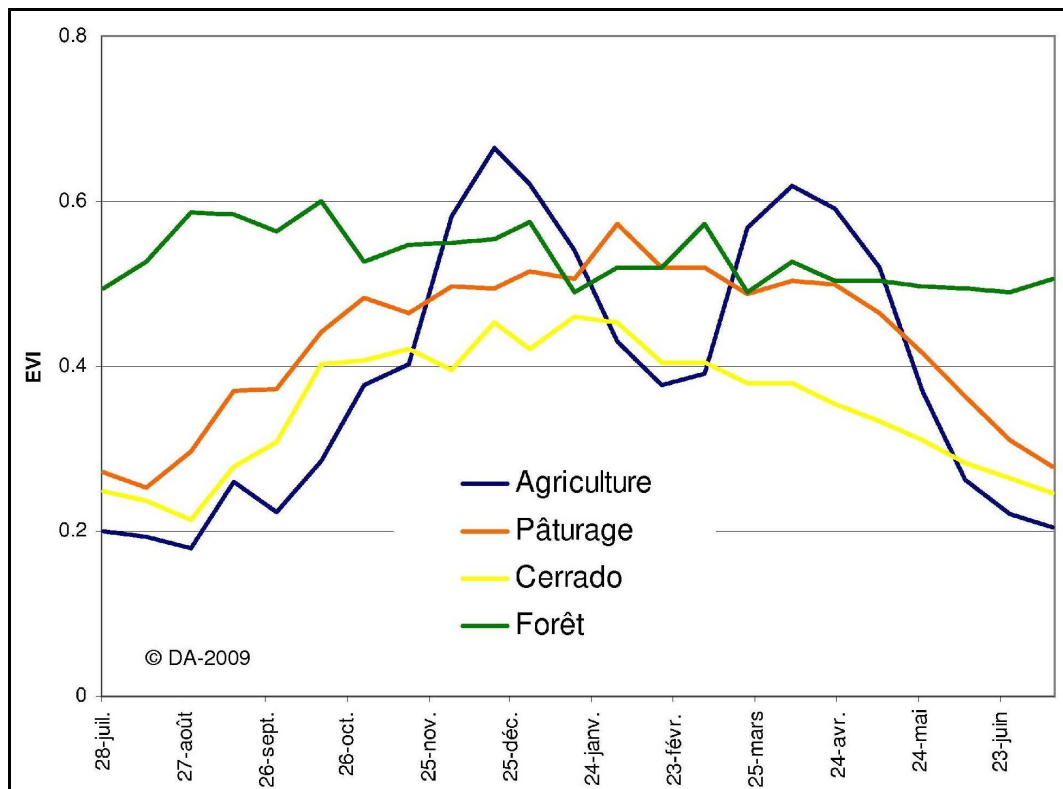


Figure 2.16 : Séries temporelles des quatre types d'occupation du sol étudié.

3.2. Lissage des séries temporelles de EVI

Les séries temporelles de EVI sont lissées par une fonction polynomiale du 8^{ème} degré pour corriger les pixels bruités. Il existe des algorithmes de lissage respectant mieux la forme originale du profil. Toutefois, étant donné la bonne séparabilité existante entre la classe « agriculture » et les autres classes, cet algorithme déjà utilisé avec succès par Jonathan (2005) est ici repris.

3.3. Extraction d'attributs des séries temporelles de EVI

La réduction du nombre de données en entrée de classification a pour but de réduire les besoins en ressources informatiques tout en permettant de conserver voire d'améliorer la qualité de la classification. Pour cela, l'extraction d'attributs (*feature extraction*) résumant l'information contenue dans le profil est une solution couramment employée (cf. chapitre 2). Six attributs des séries temporelles de EVI sont retenus d'après les propositions faites par Jonathan (2005), Galford *et al.* (2008) ou Morton *et al.* (2006) :

- moyenne de EVI sur un an;
- date du maximum de EVI ;
- valeur minimale de EVI ;
- moyenne des valeurs absolues de la dérivée du profil temporel ;
- amplitude (maximum – minimum) de EVI ;
- écart-type du profil de EVI.

Ces attributs sont sélectionnés pour leur capacité à séparer les différentes classes considérées. Les histogrammes de chaque variable (fig. 2.17) indiquent que les attributs « moyenne des valeurs absolues de la dérivée », « amplitude » et « écart-type » permettent de distinguer les surfaces agricoles des autres classes. Les variables « moyenne » et

« minimum » séparent surtout la classe forêt des autres classes. Enfin, l'attribut « date du maximum de EVI » permet de différencier la classe « forêt » et la classe « agriculture » car cette dernière présente deux modes liés aux différentes pratiques agricoles de la région. Ainsi, la culture du coton en automne entraîne un maximum de EVI au mois d'avril tandis que le maximum de EVI de la culture du soja intervient en été (décembre-janvier). Les classes « pâturage » et « cerrado » sont par contre difficilement différenciables par les six attributs à cause des fortes similarités entre leurs séries temporelles de EVI. Finalement, les six variables choisies sont normalisées pour s'affranchir des problèmes liés aux différentes unités (Jonathan, 2005).

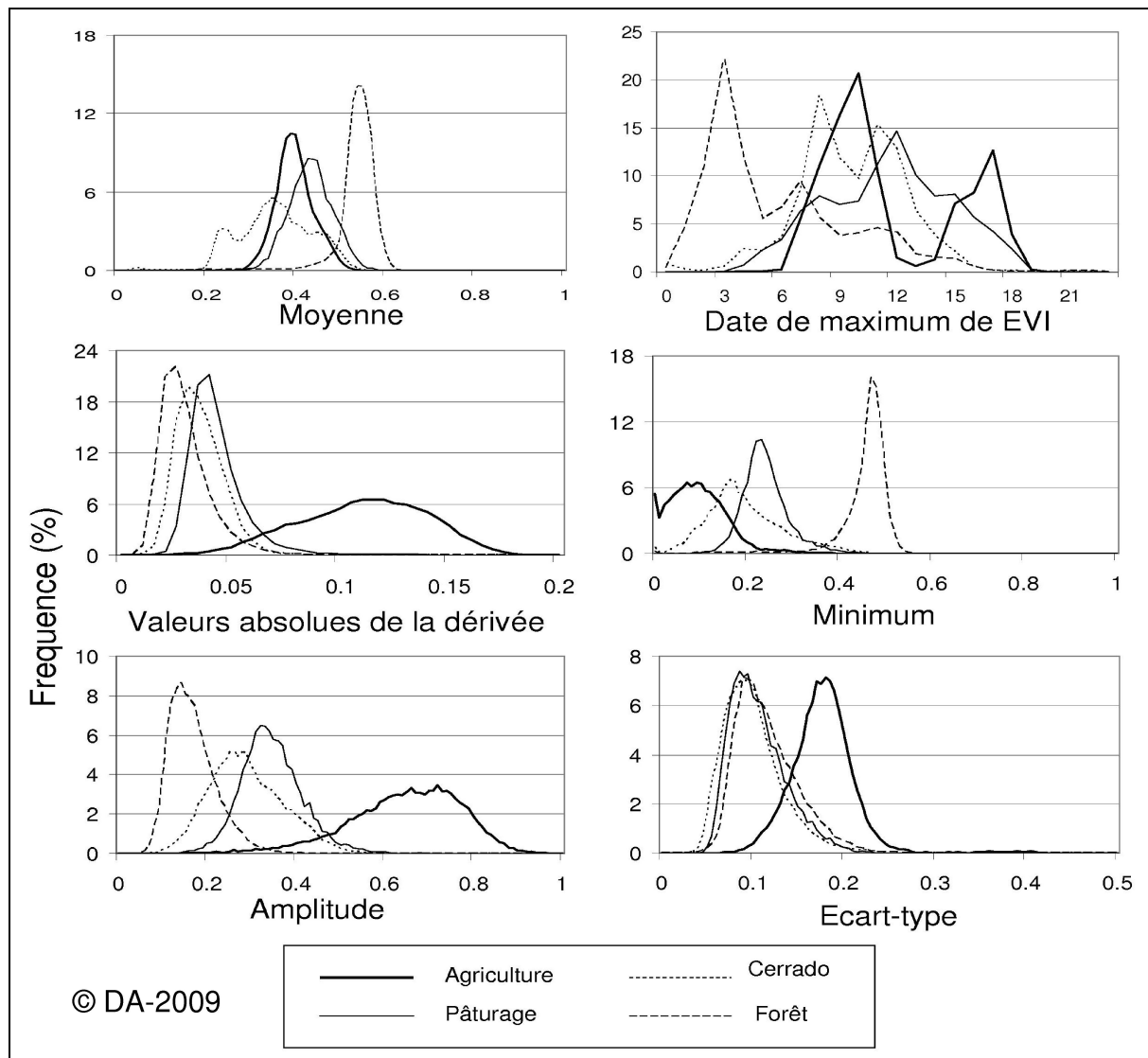


Figure 2.17: Histogrammes des quatre types d'occupation du sol selon les attributs sélectionnés.

3.4. Classification des séries temporelles de EVI

Les six variables normalisées sont intégrées comme données d'entrée de la classification. Le classificateur par Maximum de Vraisemblance est employé. L'apprentissage est réalisé à partir des données de terrain de l'année 2006-2007. Les résultats sont ensuite utilisés pour classifier l'année 2005-2006 afin de s'assurer de la validité de la méthode pour

cartographier les surfaces agricoles depuis l'année 2000-2001 même sans disposer des données de terrain.

3.5. Amélioration de la classification : application de filtres

A cette étape, des regroupements sont faits pour ne retenir que deux classes : culture et non-culture. La classification par pixel reste bruitée et il convient d'améliorer sa qualité par des traitements post-classification. Deux conditions sont appliquées afin d'éliminer les pixels isolés mal classés :

– La première condition consiste à éliminer tous les groupes de pixels dont la superficie est inférieure à 25 hectares (soit 4 pixels MODIS). Ce seuil est inspiré de Morton *et al.* (2006) qui estiment que la superficie minimale des grands défrichements est de 25 ha. En considérant que l'expansion de la culture du soja se base justement sur des déboisements importants, il ne devrait donc pas exister de parcelle isolée de soja de moins de 25 ha. Cette hypothèse est confirmée par les données de terrain : parmi les 1890 parcelles cartographiées, seulement 1,4% ont une superficie inférieure à ce seuil de 25 ha et celles-ci ne sont pas isolées en pleine forêt.

– La deuxième condition est basée sur des règles de transition d'occupation du sol entre deux années successives. On émet l'hypothèse qu'un pixel ne peut pas connaître deux changements d'utilisation du sol en 3 ans. Il s'agit donc de reclasser les pixels détectés en culture (non culture) une année (A) alors qu'ils sont considérés en non culture (culture) les années précédentes (A-1) et suivantes (A+1).

3.6. Validation de la classification

Les surfaces détectées par la classification sont comparées avec les fazendas cartographiées sur le terrain pour l'année 2005-2006 (fig. 2.18). La classification détecte 94,91% des pixels repérés sur le terrain comme étant cultivés et permet donc de valider la qualité de la classification (fig. 2.19). La validation par les statistiques agricoles officielles de l'IBGE n'est pas possible. En effet, leur estimation du total des surfaces agricoles correspond à la somme des surfaces de chaque culture et compte ainsi deux fois les parcelles semées en double culture. Ainsi, la méthodologie proposée s'avère être une bonne alternative aux estimations officielles de l'IBGE puisqu'elle permet de quantifier et localiser les surfaces cultivées.

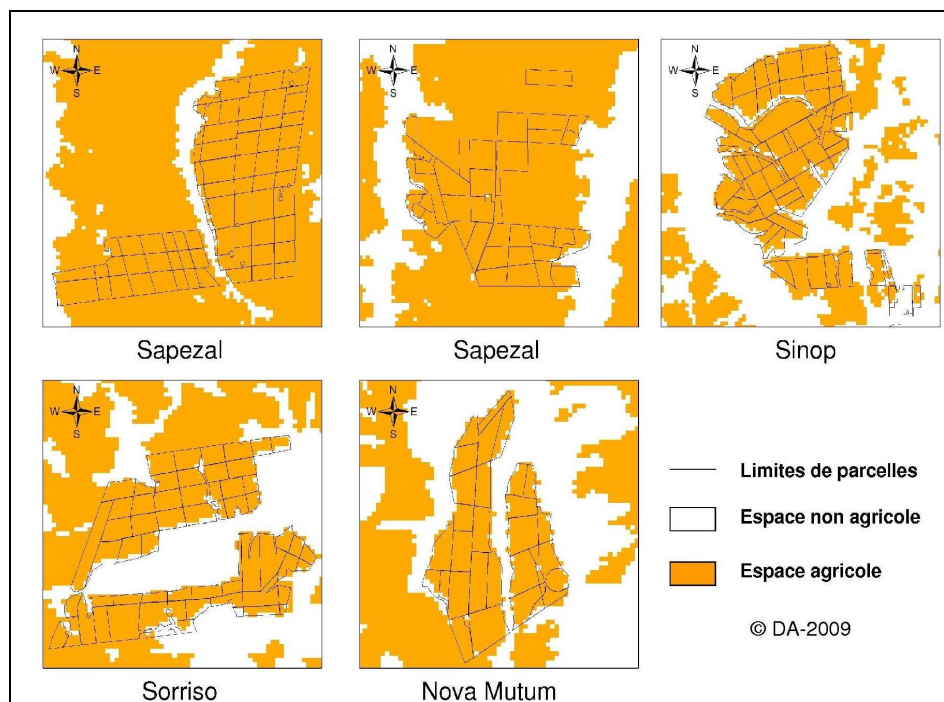


Figure 2.18 : Résultats de la création du masque agricole en 2006-2007 pour cinq fazendas choisies dans quatre communes mato-grossenses.

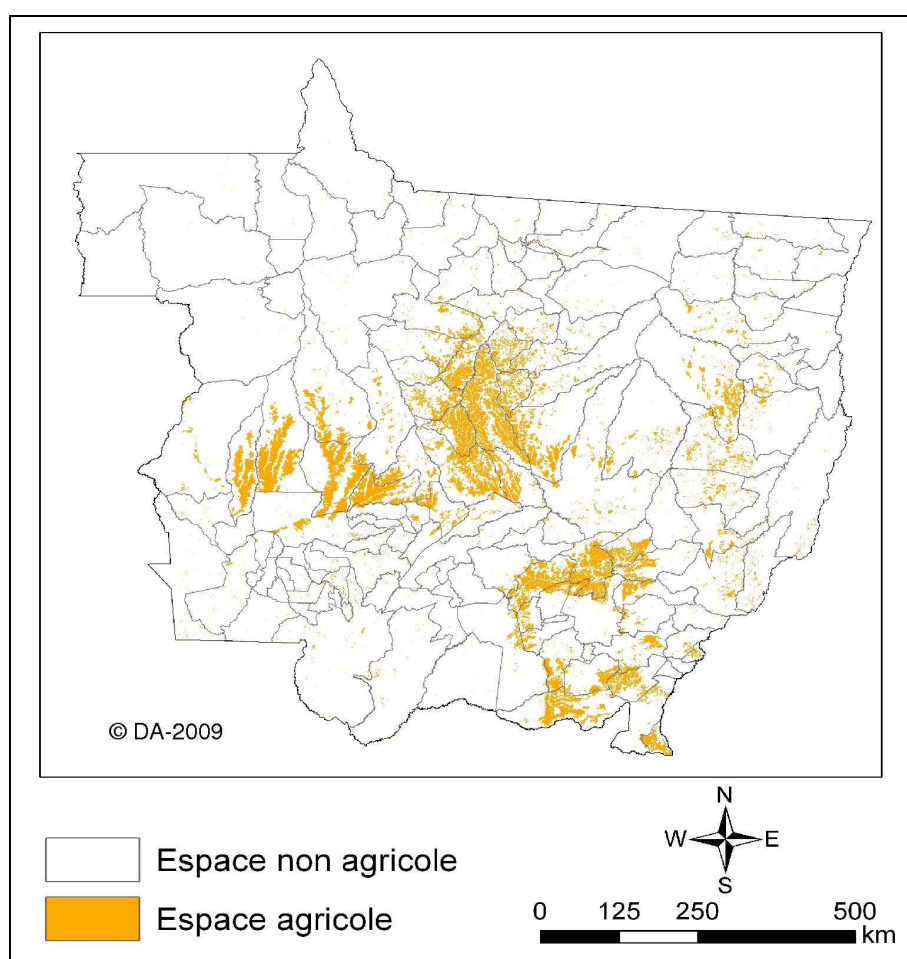


Figure 2.19 : Résultats de la création du masque agricole en 2006-2007 au Mato Grosso.

4. Cartographie des cultures et des pratiques culturales au Mato Grosso

4.1. Les séries temporelles de EVI des classes culturales

A la suite des missions réalisées sur le terrain, treize classes d'utilisation du sol ont été repérées. Parmi celles-ci, six classes ont été choisies pour être intégrées dans la classification. Le choix de ces classes a été fait selon leur degré de représentativité de l'activité agricole au Mato Grosso. Ces classes correspondent aux trois principales cultures commerciales (soja, maïs et coton) semées en simple ou double cultures. Deux classes représentent des semis en simple culture (« soja » et « coton ») et quatre classes représentent des semis en double culture (« soja+maïs », « soja+coton », « soja+millet » et « soja+sorgho »). Les cultures de millet et de sorgho ne sont pas considérées comme des cultures commerciales. Elles sont surtout semées pour assurer une couverture du sol afin de limiter l'érosion pendant la fin de la saison des pluies et parfois pour compléter l'alimentation du bétail de l'exploitation. Les autres cultures et pratiques culturales observées sur le terrain ne sont pas intégrées dans la classification. Toutefois, l'étude des séries temporelles de ces classes peut apporter quelques informations complémentaires concernant leur potentialité à cartographier l'utilisation du sol dans de le cadre de travaux futurs (cf encadré).

Les séries temporelles moyennes des six classes d'utilisation du sol sont présentées en figure 2.20. Elles représentent correctement les calendriers agricoles observés sur le terrain. Le soja est planté de fin septembre à début décembre, après le début de la saison pluvieuse. La récolte débute à la fin du mois de janvier et se poursuit jusque mi avril. Le coton peut être cultivé en simple culture (semé en décembre) ou en double culture (semé en janvier, après les premières récoltes de soja). Le maïs est semé en février après la récolte de soja. Le millet et le sorgho sont eux aussi semés après le soja, mais plus tardivement que le maïs (mars).

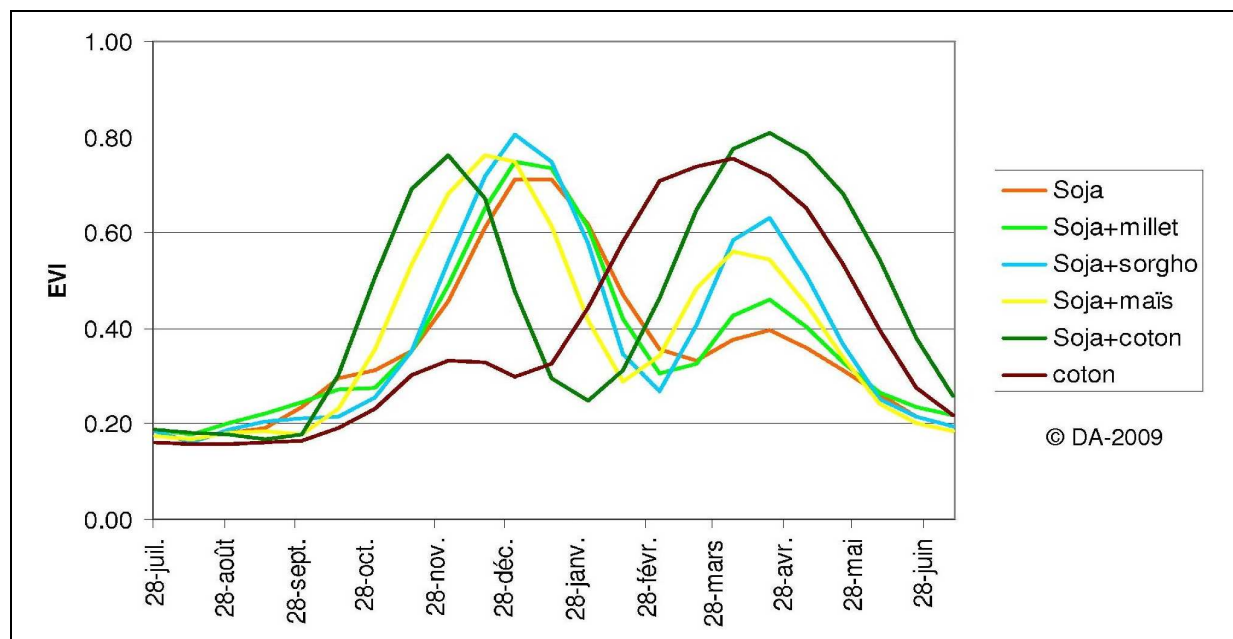


Figure 2.20 : Séries temporelles de EVI des 6 classes agricoles étudiées.

Les séries temporelles des classes agricoles au Mato Grosso

Nous présentons ici les séries temporelles de EVI obtenues pour certaines classes agricoles qui ne sont pas étudiées dans cette thèse. Ces séries montrent l'intérêt des analyses multi-temporelles MODIS TERRA/EVI pour la réalisation de futures recherches éventuelles.

- Le **riz** est généralement semé pendant un ou deux ans sur les parcelles récemment défrichées. Il permet de corriger les sols avant de semer le soja. Le riz est donc une culture qui ne se dissocie pas vraiment de la dynamique du soja puisque qu'elle ne représente qu'une étape avant la culture du soja (Mendez del Villar et Ferreira, 2005). L'étude d'une série temporelle de EVI présente clairement les caractéristiques d'un profil de riz succédant à la végétation naturelle (figure 2.21). La détection de cette culture pourrait ainsi être axée sur des règles de transition interannuelles.

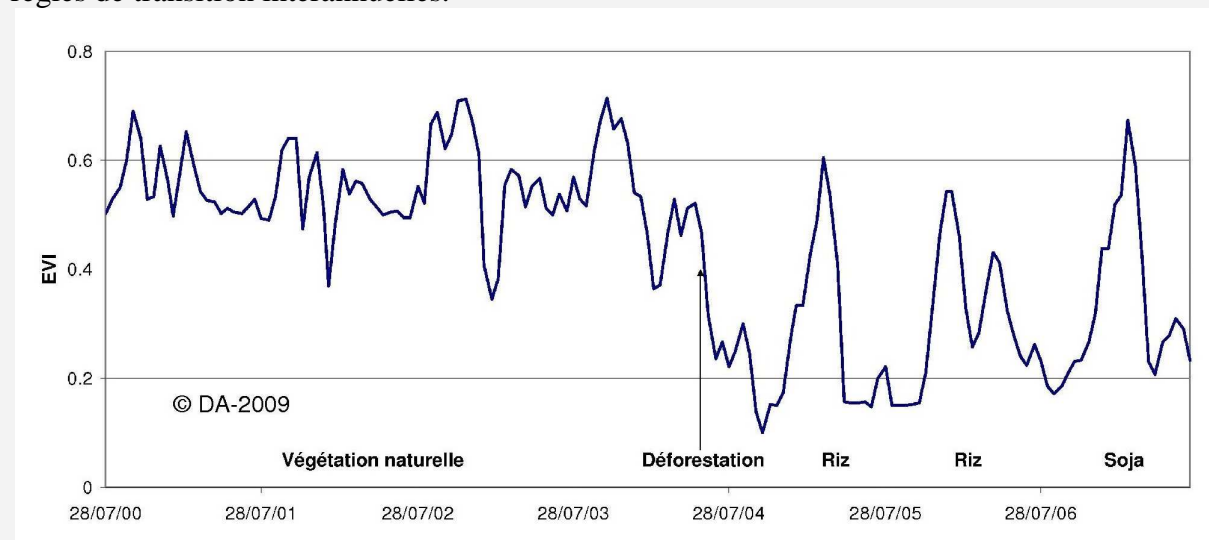


Figure 2.21 : Exemple d'un profil temporel de EVI d'une culture de riz repérée en 2005-2006.

- Les plantations **d'eucalyptus** sont généralement récentes dans la région et leur expansion pourrait s'étendre dans les années à venir. Quelques producteurs de soja ont décidé de réserver un espace de leur fazenda à ces plantations afin de pouvoir en tirer du bois prêt à être utilisé dans les séchoirs à soja (il faut en effet sécher le soja lorsque le taux d'humidité mesuré dans les graines est supérieur à un seuil de 13%). De cette manière, les producteurs n'ont plus à acheter de bois dans les scieries voisines, limitant ainsi les coûts de productions et l'utilisation de bois issu de la déforestation. Cependant, cette pratique est encore peu répandue à l'échelle du Mato Grosso et n'est donc pas présentée dans cette étude.

- La classe « **intégration culture-élevage** » (traduction directe du terme portugais *Integração Lavoura-Pecuaria*) représente un cas particulier de pratique culturale qui est amené à se généraliser dans les années à venir. Cette pratique consiste à semer en février du maïs et du pâturage conjointement après la récolte de soja. Après la récolte du maïs en juin ou juillet, le pâturage persiste et permet au producteur de mettre du bétail dans la parcelle en attendant le retour des pluies en septembre. De cette manière, une parcelle est rendue productive toute l'année ce qui est un signe fort d'intensification agricole. La série temporelle correspondant à cette pratique se distingue d'un semis « soja+maïs » par des valeurs de EVI plus élevées en début de saison sèche (juin) qui traduisent la présence d'une végétation active après la récolte du maïs (figure 2.22).

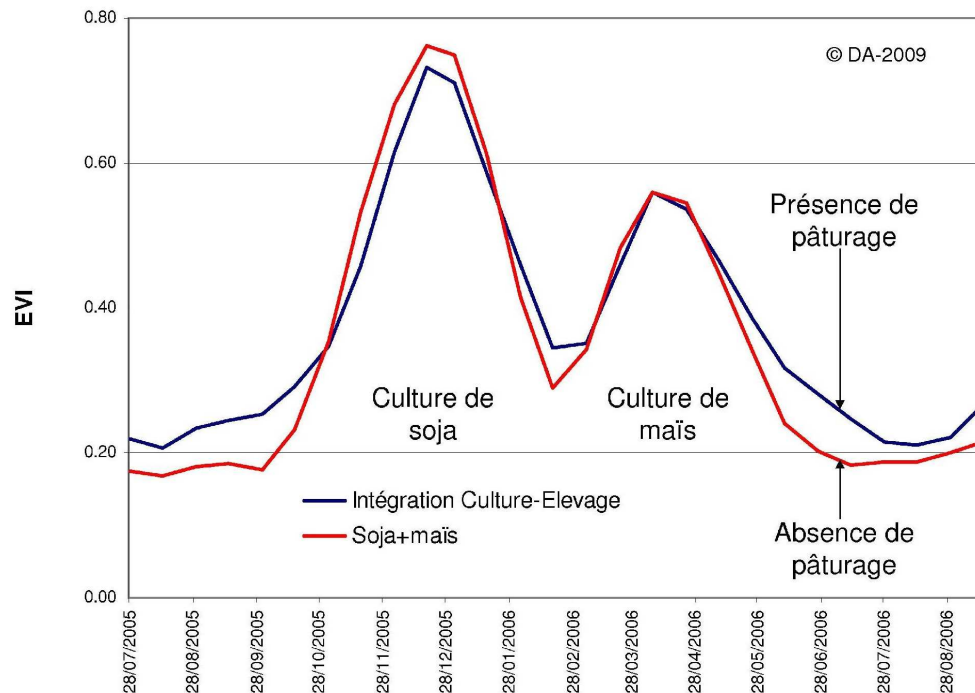


Figure 2.22 : Comparaison du profil moyen de EVI des classes « Intégration Culture-Elevage » et « Soja+maïs ».

- La classe « **Irrigation** » correspond à la présence d'un système d'arrosage des parcelles en saison sèche. Ce système est constitué d'un pivot rotatif pouvant mesurer plusieurs centaines de mètres de longueur. Son utilisation sert surtout à cultiver du coton ou des haricots. Ces pivots se repèrent facilement par télédétection. Leurs formes géométriques en rond se distinguent clairement sur les images haute résolution Landsat-TM ou CBERS-CCD (figure 2.23). Les séries temporelles de MODIS EVI traduisent, soit la présence d'une culture en saison sèche, soit un cycle du coton rallongé par rapport au cycle du coton non irrigué (figure 2.24). Par contre, le soja ne peut légalement pas être semé sous irrigation en saison sèche. Cette réglementation a été instaurée afin de limiter la prolifération de la rouille asiatique (une maladie qui affecte les parcelles de soja depuis 2002) d'une année sur l'autre. La détection des systèmes d'irrigation pourrait donc aider à analyser l'intensification agricole et permettre d'améliorer le contrôle des producteurs semant du soja en période interdite.

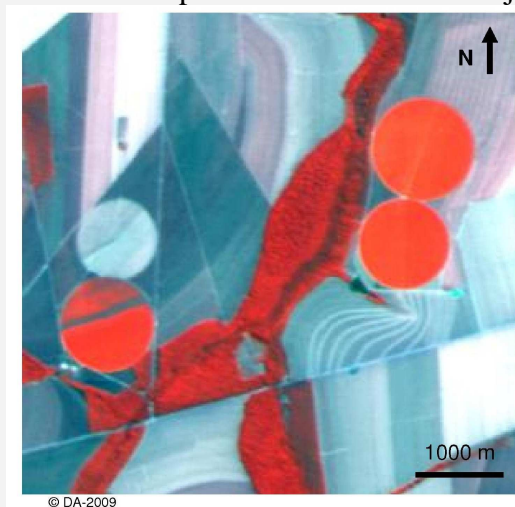


Figure 2.23 : Détection de pivots d'irrigation à Sorriso en août 2006 à partir de données CBERS.

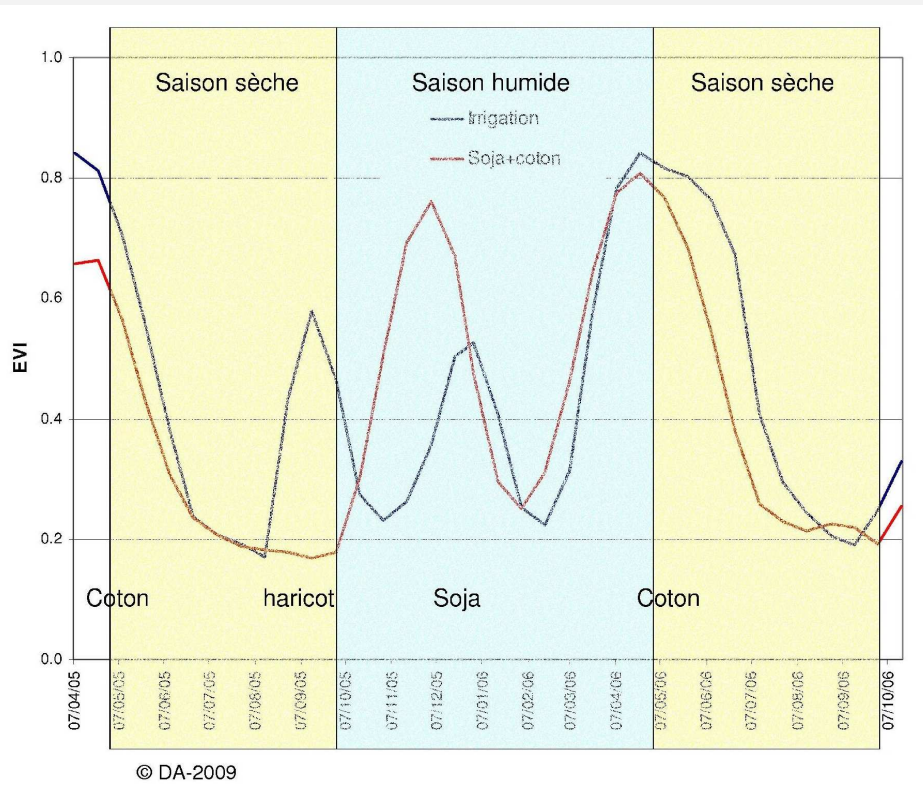


Figure 2.24 : Comparaison d'un profil temporel de EVI d'un pixel avec un pivot en saison sèche et du profil moyen de la classe « soja+coton » (sans pivot).

- La culture de la **canne à sucre** est également présente au Mato Grosso (202 000 hectares en 2006 selon l'IBGE). Les plantations se trouvent localisées autour de douze centres de transformation (UDOP). En fait, l'expansion des surfaces plantées en canne à sucre est conditionnée par la présence de ces usines. Selon les entretiens réalisés sur le terrain, cette culture n'est rentable au Mato Grosso que si les plantations sont situées à moins de 60 kilomètres d'un centre de transformation. Lors de la mission de terrain de 2007, nous avons visité l'usine COPRODIA de Campo Novo do Parecis et récolté des cartes des surfaces cultivées. Plus de 30000 hectares ont ainsi pu être cartographiés. Toutefois, cette classe n'a pas été incluse dans la classification car, en tant que culture permanente, le cycle végétatif de la canne à sucre (12 à 18 mois selon les variétés) ne peut pas être détecté par une classification basée sur les profils annuels de MODIS EVI. Malgré tout, il serait intéressant d'évaluer les possibilités de détection de la canne à sucre à partir de ces données. Un exemple de série temporelle de EVI différencie correctement les cycles de croissance de la canne à sucre des cycles de culture de soja. A Campo Novo do Parecis, le soja est semé tous les cinq ou six ans dans les parcelles de canne à sucre afin de corriger les sols (figure 2.25). Cette rotation peut donc laisser penser que des règles de transition interannuelles aideraient à différencier des parcelles de canne à sucre et des pâturages.

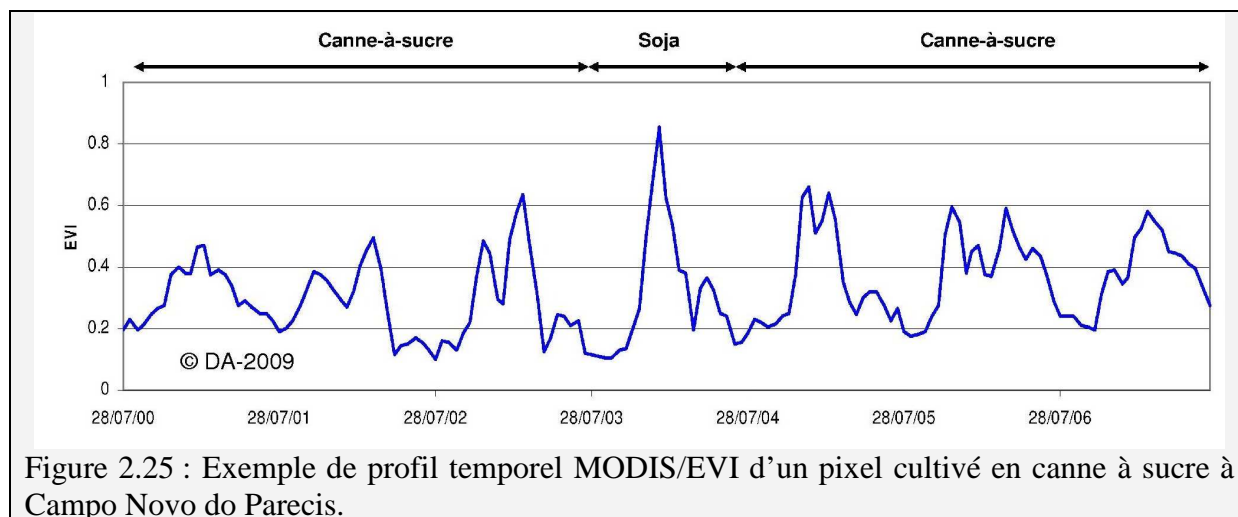


Figure 2.25 : Exemple de profil temporel MODIS/EVI d'un pixel cultivé en canne à sucre à Campo Novo do Parecis.

4.2. Le lissage des séries temporelles de EVI

La fonction polynomiale est considérée efficace pour séparer des séries temporelles de EVI facilement séparables telles que celles correspondant aux classes d'agriculture, forêt, pâturage ou cerrado (Jonathan, 2005). Cependant, les séries temporelles des différentes cultures sont beaucoup plus confuses (fig. 2.20). Un algorithme de lissage répondant à cette problématique est donc indispensable.

Quatre méthodes de lissage sont testées : WLS, BISE, MVI et filtre SG (cf Partie 2- Chapitre 2). Le choix de la méthode se base sur les quatre critères proposés par Klich *et al.* (2007) : diminution des bruits de haute fréquence, conservation des attributs propres à chaque série temporelle, conservation des valeurs les plus élevées, conservation de la temporalité des séries temporelles.

Outre le fait de déterminer le meilleur algorithme de lissage, les tests ont pour objectifs de déterminer les paramètres optimaux pour chaque méthode (tableau 2.4). Pour chaque méthode, ces paramètres sont testés sur dix séries temporelles (5 pixels pendant 2 ans). Une partie de ces résultats sont présentés en figure 2.26.

Méthode	Paramètres	Valeurs testées
WLS	Taille de la fenêtre mobile	3 ; 5 ; 7
	Poids	0,05 ; 0,5 ; 1,5 (poids proposés par Swets <i>et al.</i> (1999))
BISE	Taille de la fenêtre mobile	2 ; 3 ; 4 ; 5
	Seuil	120% (fixé par Viovy <i>et al.</i> (1992))
MVI	Seuil	5% ; 7,5% ; 10% ; 12,5%
filtre SG	Taille de la fenêtre mobile	5 ; 7 ; 9
	Coefficients	Fixés par Savitzky et Golay (1964) selon la taille de la fenêtre mobile

Tableau 2.4. Paramètres testés pour les différentes méthodes de lissage.

Les résultats montrent que plus les fenêtres mobiles employées sont grandes, plus le lissage est important. Or, un lissage trop fort est inadéquat dans le cas de l'étude de cultures car la courbe ne marque pas assez la rechute de EVI lors de la période d'intercultures. Ces

paramètres entraînent donc une perte d'information en ne décelant pas correctement le changement d'utilisation du sol au cours de l'année agricole.

A l'inverse, une fenêtre mobile petite s'adapte mieux aux classes cultivées en conservant les deux modes de culture (si ils sont présents). Cependant les valeurs maximales de EVI sont parfois surestimées et intègrent donc une trop forte perte d'information sur l'activité végétative des plantes. Par ailleurs, dans le cas de l'étude de végétation naturelle (forêt, *cerrado*), ces fenêtres n'éliminent pas suffisamment les bruits. Les profils conservent beaucoup de chutes de EVI qui peuvent entraîner une certaine confusion avec des cycles culturels en phase de classification.

Il est donc préférable de choisir une fenêtre mobile de taille intermédiaire (5 périodes pour les méthodes WLS et filtre SG et 3 pour la méthode BISE). Cela permet de conserver une partie de l'information sur les cultures tout en éliminant la majorité du bruit présent dans les profils de forêts.

Le raisonnement est le même pour l'application de la méthode MVI. Un seuil élevé (0,125) conserve mieux les chutes réelles de EVI correspondantes aux périodes d'intercultures mais n'élimine pas correctement les bruits moins marqués. Ces bruits sont mieux éliminés par un seuil faible (0,05), ce qui permet de lisser correctement les profils de végétation naturelle. Par contre, une partie de l'information liée aux pratiques culturales est perdue par un lissage trop marqué en période d'intercultures. Ici aussi, un choix intermédiaire s'impose donc : le seuil de 0,1 est le plus pertinent.

L'étude préliminaire réalisée montre donc l'importance du choix des paramètres pour un lissage optimal des séries temporelles de EVI. Un lissage trop fort entraîne une perte d'informations sur les changements d'utilisation du sol (non détection d'une période d'intercultures due à un lissage trop important). A l'inverse, un lissage peu efficace n'élimine pas assez les bruits pouvant entraîner la détection de faux changements d'utilisation du sol (détection de fausses périodes d'intercultures dues à la présence de bruit). Les quatre méthodes et leurs paramètres optimaux sont à présent comparées pour choisir celle qui sera utilisée dans cette thèse (figure 2.27).

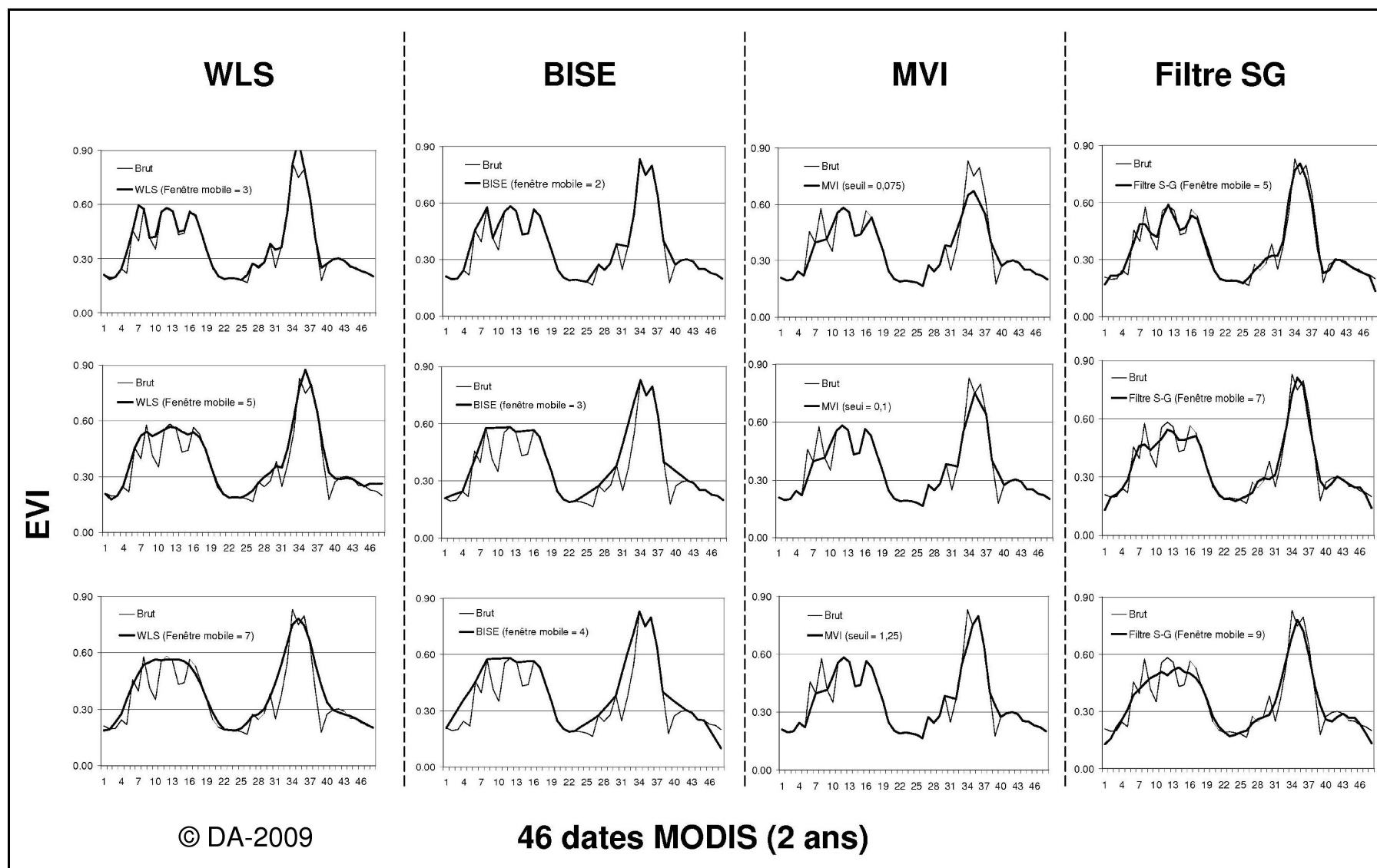


Figure 2.26 : Exemples de lissages de séries temporelles de EVI avec différents paramètres appliqués aux algorithmes WLS, BISE, MVI, Filtre SG.

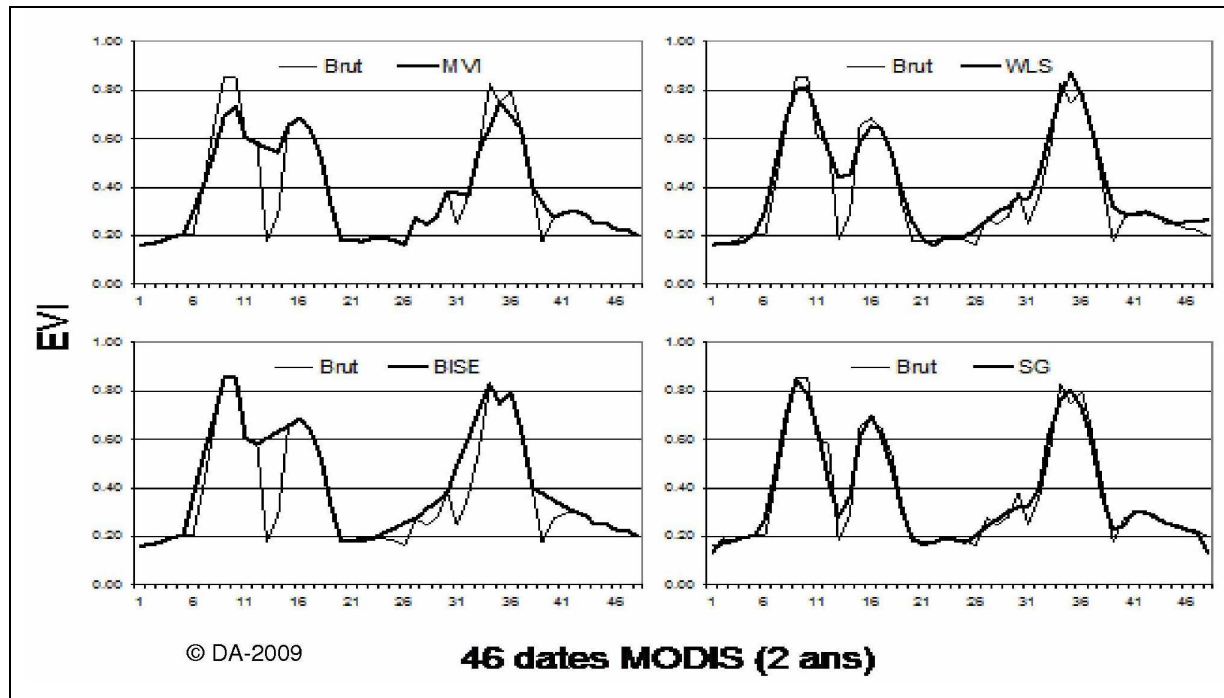


Figure 2.27 : Comparaison des différentes méthodes de lissage de série temporelle de EVI.

La comparaison des méthodes se base sur les critères proposés par Klisch *et al.* (2006) :

Diminution des bruits de haute fréquence

Toutes les méthodes parviennent à réduire les bruits et donc la variabilité intra-classe. Ceci est essentiel en vue de réduire les confusions entre classes lors de la classification. La méthode BISE est celle qui les élimine le mieux et le filtre de Savitzky-Golay les élimine le moins bien. Les deux autres méthodes ont des résultats intermédiaires.

Conservation des attributs propres à chaque série temporelle

La méthode BISE, en éliminant trop les bruits de haute fréquence, reste en retrait pour capter les baisses de EVI entre les deux cycles culturels (dans le cas de double culture). Dans le cas de pixels de culture, la méthode WLS élimine mieux les bruits et garde donc un aspect général plus réaliste. Cependant, le filtre SG apparaît plus performante pour repérer les cycles à double culture. Ceci est important pour la classification des pratiques culturales et donc l'étude de l'intensification agricole.

Conservation des valeurs les plus élevées.

La méthode BISE est plus apte à réaliser cette tâche puisque les données originales élevées sont conservées. Toutefois, cette caractéristique retient également les faux pics de EVI, ce qui peut entraîner la détection de faux modes culturels. La méthode MVI corrige sans distinction les faux pics et les valeurs trop faibles. Cette méthode élimine donc également des valeurs hautes de EVI qui devraient être gardées car elles sont souvent caractéristiques de la présence de culture. Enfin, les méthodes WLS et SG ré estiment tous les points du profil (ce qui permet d'éliminer les faux pics de EVI et donc d'éviter la détection de faux modes de culturels) en se basant sur les valeurs supérieures de la courbe (ce qui permet de conserver l'information séparant les cultures des autres classes).

Conservation de la temporalité des séries temporelles

La méthode la moins performante est la méthode BISE. Elle occulte au maximum les faibles valeurs et coupe ainsi certaines chutes d'EVI réelles. Elle estime donc incorrectement le calendrier agricole. Les trois autres méthodes respectent plus fidèlement les dates de début et de fin de cycle. Le filtre SG notamment conserve bien les informations du calendrier agricole, ce qui est essentiel pour discriminer les cultures.

Le tableau 2.5 résume la notation de chaque critère d'analyse pour les différents algorithmes. Une note sur 3 est attribuée, 3 représentant la note maximale.

Note /3	WLS5	BISE3	MVI1000	SG5
Bruits fréquents	2,5	3	2,5	2
Aspect général	3	2	2	3
Valeurs sup.	2,5	3	2	2,5
Temporalité	2,5	1	2,5	3
Total	10,5	9	9	10,5

Tableau 2.5 : Résumé de l'analyse préliminaire des différents algorithmes de lissage des séries temporelles d'indices de végétation.

L'analyse de ce tableau permet de faire ressortir deux méthodes. D'une part, la méthode du Weighted Least Squares (WLS) proposée par Swets *et al.* (1999). D'autre part, le filtre de Savitzky-Golay proposé par les auteurs du même nom en 1964. Afin de valider plus précisément celle qui apporte les meilleurs résultats, ces deux méthodes sont appliquées aux données MODIS. L'utilité des séries temporelles lissées est alors comparée au cours de la phase de réduction de dimensionnalité.

4.3. La sélection de variables

Appliquer un processus de *feature extraction* comme il a été fait pour la première classification implique de calculer des attributs pour des cycles végétatifs courts (de 90 à 130 jours pour le soja par exemple). Or, des attributs issus de séries temporelles dont la résolution est de 16 jours ne permettent pas de bien différencier les classes (les attributs temporels tels que la durée d'un cycle végétatif ou la date de maximum de EVI seraient en fait définis par des variables discrètes pas assez précises). Il est donc préférable d'appliquer une méthode de *feature selection* pour réduire la dimensionnalité du jeu de données initial.

Cette méthode se base sur l'application de tests de séparabilité par la distance de Jeffries-Matusita (cf. encadré Partie 2-Chapitre 2). Dans un premier temps, ces tests permettent d'apprécier le potentiel de discrimination entre les six classes de l'étude (tableau 2.6). Par la suite, les tests sont appliqués pour chaque image (date) des séries temporelles annuelles pour évaluer leur potentiel de séparabilité.

4.3.1. Tests de séparabilité sur les séries temporelles annuelles de EVI

Les distances de Jeffries Matusita calculées pour les six classes à partir des données lissées par le filtre SG et la méthode WLS sont présentées dans le tableau 2.6. Le lissage par le filtre de Savitzky-Golay présente de meilleurs résultats que ceux obtenus par la méthode du Weighted Least Squares. En effet, le test de séparabilité J_{ave} donne de meilleurs résultats avec ce filtre (0,658 contre 0,632 avec la méthode WLS). Cette supériorité est confirmée par les

distances de Jeffries-Matusita de chaque paire de classes. Ainsi, le filtre de Savitzky-Golay est conservé pour la suite de l'étude

Le potentiel de séparabilité moyen J_{ave} entre les six classes est relativement faible (inférieur à 1 alors que la note maximale est 2). Cependant, cela ne signifie pas qu'aucune classe n'est séparable des autres. L'analyse de la séparabilité entre paires de classes permet d'affiner l'étude. Certaines classes sont effectivement très difficilement séparables comme les classes « soja » et « soja + millet » qui présentent un potentiel de séparabilité particulièrement faible (distance de Jeffries-Matusita inférieure à 1). La classe « soja+sorgho » montre des résultats plus élevés mais ceux-ci sont fortement critiquables à cause de la petite taille de l'échantillon considéré (189 pixels seulement). Par contre, les classes « soja+coton », « soja+maïs » et « coton » sont correctement séparables par rapport aux autres classes (distance supérieures à 1,9).

En conséquence, les principales cultures commerciales (soja, coton et dans une moindre mesure maïs) sont statistiquement séparables. Au contraire, la pratique culturale consistant à semer une culture de millet ou de sorgho pour protéger les sols après la récolte du soja est difficile à détecter à partir des séries temporelles de EVI. Ces informations nous donnent donc des indications sur les potentialités de la classification.

Lissage WLS	23 dates					
Nb Pixels	2384	4996	189	4158	3374	1202
	soja	soja+millet	soja+sorgho	soja+maïs	soja+coton	coton
soja		0.6826	1.8216	1.4741	1.9622	1.9497
soja+millet			1.7838	1.4502	1.9764	1.9726
soja+sorgho				1.7186	1.9827	1.9944
soja+maïs					1.8871	1.9809
soja+coton						1.9269
coton						
					J_{ave}	0.636

Lissage SG	23 dates					
	soja	soja+millet	soja+sorgho	soja+maïs	soja+coton	coton
soja		0.8676	1.9223	1.5404	1.9754	1.9786
soja+millet			1.8919	1.5281	1.9841	1.9885
soja+sorgho				1.8429	1.9919	1.999
soja+maïs					1.9207	1.9888
soja+coton						1.9433
coton						
					J_{ave}	0.658

Tableau 2.6 : Distances de Jeffries-Matusita calculées pour l'année 2005-2006 sur les 23 dates des profils temporels de EVI d'après les données lissées par WLS et SG.

4.3.2. Tests de séparabilité sur chaque image composant les séries temporelles de EVI

Afin d'améliorer la classification finale et de réduire le nombre de variables prises en compte, Wardlow *et al.* (2007) ont proposé d'appliquer ce test de séparabilité pour chaque image MODIS. Ceci permet de repérer les dates auxquelles il est possible d'obtenir une forte discrimination entre classes. Ces tests sont ici réalisés à partir des six classes précédemment définies et des données de EVI lissées par le filtre de Savitzky-Golay. Les figures résultantes présentent le potentiel de discrimination entre une classe et les cinq autres classes pour chaque date de la série temporelle (fig. 2.28).

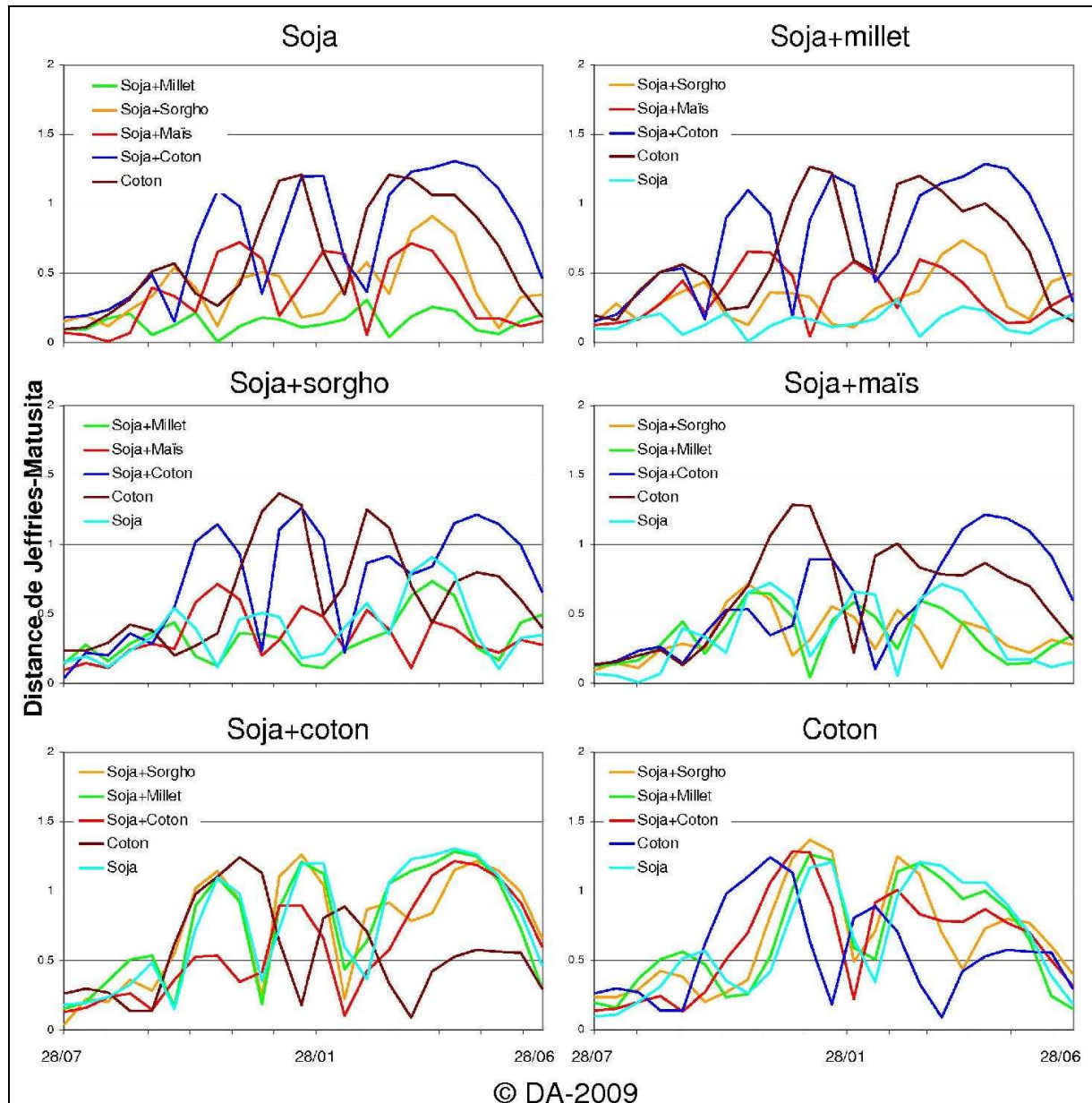


Figure 2.28 : Distance de Jeffries-Matusita mesurée entre chaque classe et les cinq autres classes pour chaque image MODIS.

Les graphes de la figure 2.28 confirment par exemple que les classes « Soja+Coton » et « Coton » sont correctement séparables des cinq autres classes puisque toutes les courbes présentent des valeurs élevées à un moment de l'année. Par exemple, la classe « soja+coton » se différencie des classes « soja », « soja+millet », « soja+sorgho » et « soja+maïs » en fin d'année (avril-mai) et de la classe « coton » en décembre. Ceci s'explique par les calendriers agricoles. Au contraire, la classe « soja+millet » (par exemple) n'est fortement séparable que des classes « Soja + Coton » (en avril-mai) et « Coton » (en décembre). Pour les autres classes (« soja », « soja+sorgho », « soja+maïs»), les distances de Jeffries-Matusita restent faibles (<1) tout au long de l'année traduisant un faible potentiel de discrimination.

Pour évaluer le potentiel de discrimination entre les six classes à chaque date, l'indice moyen J_{ave} est calculé pour chaque image. La figure 2.29 présente l'évolution de cet indice au

cours de l'année 2005-2006. Ce graphe confirme les conclusions déjà entrevues concernant les dates de meilleure séparabilité.

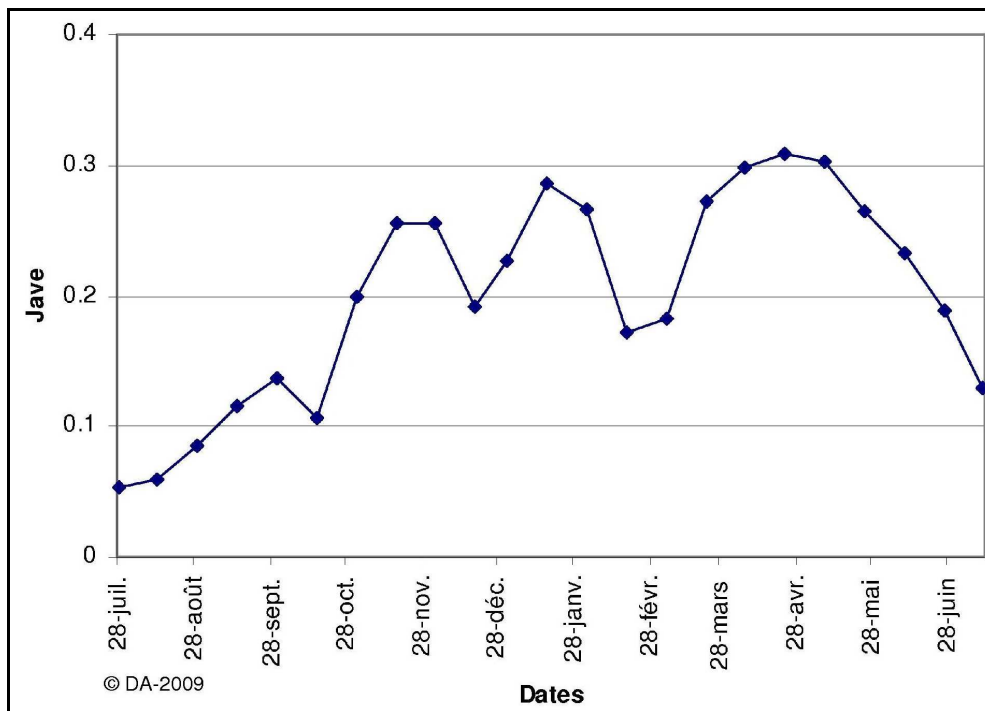


Figure 2.29 : Evolution de l'indicateur de séparabilité moyen Jave au cours de l'année selon les différentes données de EVI.

Une meilleure distinction entre classes peut être obtenue à deux périodes de l'année. Tout d'abord, le mois de mai (jours juliens 113-129) permet une meilleure distinction générale entre les classes qui s'explique par la présence ou l'absence de coton à cette période. Le mois de janvier (jours juliens 001-017) permet également une bonne distinction entre les classes de coton et de soja. A cette période, le semis du coton est en cours alors que le soja (hormis de la classe « soja+coton ») est à son maximum. Au mois de novembre (jours juliens date 321-337), un troisième pic de séparabilité apparaît. Celui-ci correspond à une époque où le soja semé le plus tôt (pour être récolté en janvier-février afin de semer ensuite du coton ou du maïs) atteint son maximum, tandis que les dernières parcelles de soja viennent d'être semées et présentent donc des valeurs de EVI faibles.

4.3.3. Feature selection

La sélection des variables est réalisée en triant les images selon un ordre décroissant correspondant à leur valeur de Jave (tableau 2.7). L'étape suivante consiste à insérer chaque variable une à une dans une nouvelle combinaison de variables. 23 combinaisons de variables sont donc créées, chacune comprenant entre une et 23 images. Ces combinaisons sont testées en phase de classification afin de déterminer la combinaison optimale.

N°Variable	Dates MODIS	Date	Jave
1	DOY113	23/04	0,309
2	DOY129	09/05	0,303
3	DOY097	07/04	0,298
4	DOY017	17/01	0,287
5	DOY081	22/03	0,271
6	DOY033	02/02	0,266
7	DOY145	25/05	0,264
8	DOY321	17/11	0,256
9	DOY337	03/12	0,255
10	DOY161	10/06	0,232
11	DOY001	01/01	0,226
12	DOY305	01/11	0,200
13	DOY353	19/12	0,192
14	DOY177	26/06	0,189
15	DOY065	06/03	0,183
16	DOY049	18/02	0,172
17	DOY273	30/09	0,137
18	DOY193	12/07	0,130
19	DOY257	14/09	0,116
20	DOY289	16/10	0,106
21	DOY241	29/08	0,085
22	DOY225	13/08	0,059
23	DOY209	28/07	0,053

Tableau 2.7 : Classement des images/dates MODIS TERRA/EVI selon leur potentiel de séparabilité pour les six classes de l'étude (DOY = Day Of Year).

5. Classification et résultats

Les performances des 23 combinaisons sont testées avec les algorithmes de classification « Maximum de Vraisemblance » et « Spectral Angle Mapper ». Par contre, l'arbre de décision CHAID Improved intègre déjà une étape de sélection des variables. Il est donc directement expérimenté avec les 23 images de EVI en entrée. La qualité des classificateurs est évaluée à partir des indices de Kappa et des matrices de confusion.

Les résultats pour les classificateurs Maximum de Vraisemblance et Spectral Angle Mapper sont présentés dans la figure 2.30. Dans les deux cas, les résultats obtenus avec peu d'images en entrée sont très faibles. Les résultats commencent à s'améliorer à partir de l'intégration de la 4^{ème} image. Un plateau est atteint après l'intégration de la 6^{ème} variable. L'indice de Kappa augmente tout de même légèrement par la suite en intégrant d'autres variables. Il atteint alors une valeur maximale avant de rechuter légèrement en intégrant d'autres variables. Il existe donc bien un effet de Hughes (Van Niel *et al.*, 2005) que la méthode *feature selection* permet de supprimer.

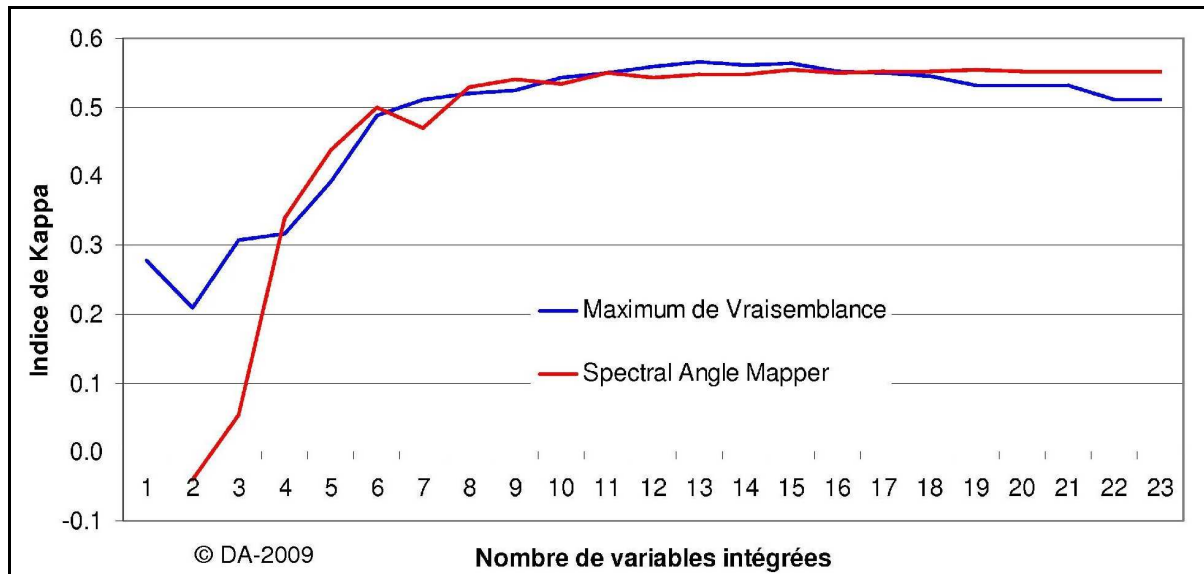


Figure 2.30 : Comparaison des classificateurs Maximum de Vraisemblance et Spectral Angle Mapper selon le nombre d'images MODIS TERRA/EVI (lissées par le filtre de Savitzky-Golay) intégrées en entrée de la classification.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le classificateur en Maximum de Vraisemblance en intégrant 13 variables correspondant aux images (dates) suivantes : 001 (01/01), 017 (01/17), 033 (02/02), 081 (03/22), 097 (04/07), 113 (04/23), 129 (05/09), 145 (05/25), 161 (06/10), 305 (11/01), 321 (11/17), 337 (12/03), 353 (12/19). L'indice de kappa est de 0,5655 et la précision globale est de 65,98%.

Le Spectral Angle Mapper présente des résultats optimaux en intégrant les 11 premières variables de la liste du tableau 2.7. L'indice de kappa est de 0,5488 et la précision globale est de 64,31%. Les résultats entre les deux classificateurs sont donc très proches. Cependant, un test de Mc Nemar ($z = -5.64$) indique que la différence est significative avec une marge d'erreur de 5%. La classification par Maximum de Vraisemblance est donc bien la meilleure.

L'arbre de décision CHAID Improved a été calculé à partir du logiciel Sipina¹. Les résultats s'avèrent très faibles (Kappa = 0,3 et précision totale = 44,43%)². Ceci s'explique par le fait que le résultat d'une classification par arbre de décision dépend des seuils qui sont déterminés à chaque nœud de l'arbre. Or, le calcul de ces seuils est ici réalisé sur les données d'entraînement de l'année 2005-2006. Toute variation importante dans le profil de la même classe dans une autre année peut alors rendre le seuil inadéquat. La qualité de la classification se trouve donc fortement affectée par la variabilité interannuelle des séries temporelles de EVI. Cette variabilité peut être due à des conditions particulières sur le terrain (conditions climatiques, apparition de maladies, changements dans les calendriers agricoles...) ou à un effet dû à la taille de l'échantillon (les données de terrain récoltées en 2006-2007 sont plus nombreuses qu'en 2005-2006). La figure 2.31 illustre cette variabilité en comparant les profils temporels moyens des classes « Soja+Coton » pour les années 2005-2006 et 2006-2007. Lors de l'année 2005-2006, les valeurs de EVI correspondant au cycle du coton ont été bien plus élevées que lors de l'année 2006-2007. Le fait que ce profil de coton soit plus élevé a entraîné

¹ <http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/sipina.html>

² D'autres tests effectués avec les données EVI lissées par la méthode WLS donnent cependant des résultats meilleurs. L'indice de Kappa atteint 0,383 et la précision est de 55,48%. Il apparaît donc que le choix d'un classificateur et d'un algorithme de lissage soit en fait lié (Arvor *et al.*, 2008a).

le calcul d'un seuil de EVI élevé et donc non reproductible sur les données de l'année suivante.

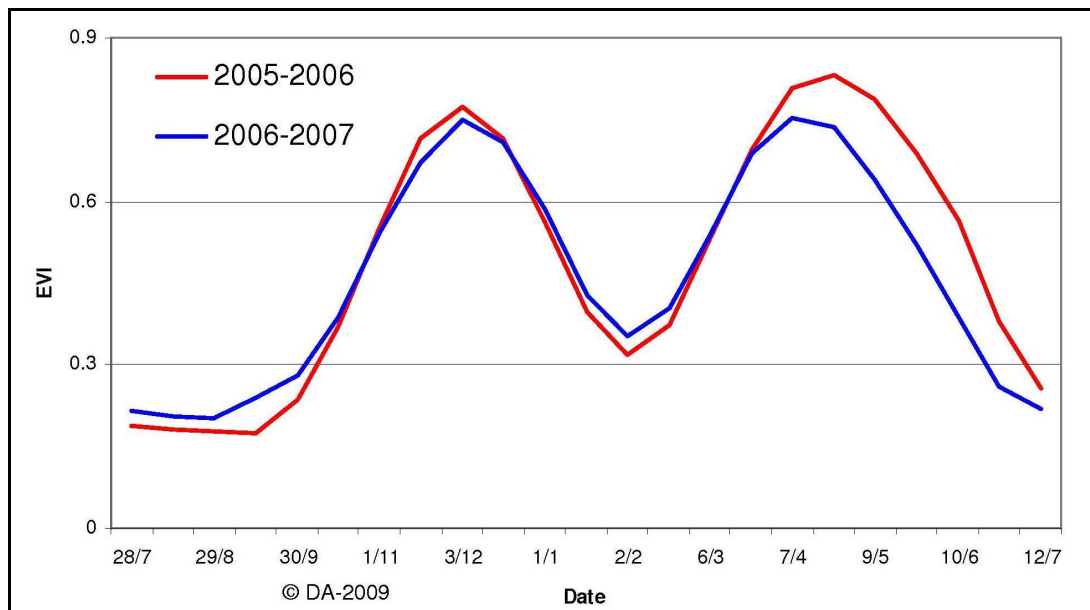


Figure 2.31 : Comparaison des profils temporels moyens de la classe « Soja+Coton » pour les années 2005-2006 et 2006-2007.

Les classifications par arbre de décision et par Spectral Angle Mapper sont écartées de la suite de l'étude car les résultats ne sont pas satisfaisants. La matrice de confusion présentée par le tableau 2.8 permet de mieux analyser le résultat de la classification par la méthode de Maximum de Vraisemblance.

Les résultats des classes « coton » et « soja+coton » répondent aux seuils d'acceptabilité fixés par la littérature puisque les précisions de l'utilisateur et du producteur sont supérieures à 70% (Congalton, 1991 ; Foody, 2002). Les résultats sont acceptables pour la classe « soja+maïs » même si il existe une confusion avec la classe « soja+sorgho ». Pour cette dernière classe et pour les autres classes « soja » et « soja+millet », les résultats ne sont pas satisfaisants. Il existe une forte confusion entre ces classes. Les classes « soja+millet » et « soja+sorgho » ont des calendriers agricoles similaires et il est donc aisé de comprendre pourquoi ces classes sont peu séparables. Elles correspondent d'ailleurs à une même pratique agricole (semis d'une couverture végétale après la récolte du soja pour protéger les sols) donc leur confusion n'est pas problématique. Par contre, il est plus surprenant que la classe « soja » soit aussi confondue avec la classe « soja+millet ». Le classificateur ne parvient pas à détecter correctement si une culture de millet a été semée après la récolte du soja ou si les sols ont été laissés au repos. En fait, quand la terre est laissée au repos, une végétation adventice repousse tout de même avec les dernières précipitations de la saison des pluies. Cette végétation plus ou moins dense est captée par les séries temporelles de EVI par un petit mode. Celui-ci se confond avec le mode correspondant à une culture de millet.

		Terrain						Total
		Soja	Soja+millet	Soja+sorgho	Soja+maïs	Soja+coton	Coton	
Classification	Soja	713	810	142	611	149	276	2701
	Soja+millet	373	1600	148	1035	31	11	3198
	Soja+sorgho	40	468	355	1820	66	5	2754
	Soja+maïs	46	416	162	5874	710	43	7251
	Soja+coton	1	30	6	286	5140	81	5544
	Coton	62	32	1	87	504	2710	3396
	Total	1235	3356	814	9713	6600	3126	24844
Producer's Accuracies		57.73%	47.68%	43.61%	60.48%	77.88%	86.69%	
User's Accuracies		26.40%	50.03%	12.89%	81.01%	92.71%	79.80%	
Overall Accuracy		65.98%						
KAPPA		0.5655						

Tableau 2.8 : Matrice de confusion obtenue par le classificateur en Maximum de Vraisemblance avec les données EVI lissées par le filtre SG et 13 variables en entrée.

6. Amélioration de la classification : l'approche orientée-objets

Les résultats de la classification sont mitigés. Les indicateurs Kappa et Précision Globale sont en dessous des seuils conseillés¹. Cela s'explique par une forte hétérogénéité dans le potentiel de classification de chaque classe. Certaines classes sont bien séparables (« coton » et « soja+coton ») tandis que d'autres sont difficiles à discriminer (« soja+millet » et « soja+sorgho » par exemple). Ces fortes confusions entraînent un effet sel-et-poivre important. Supprimer cet effet permettrait donc d'améliorer sensiblement la classification. Pour cela, l'application de règles sur la superficie ou sur les transitions interannuelles comme il avait été fait pour la première classification ne peut être effectuée. En effet, la taille des parcelles agricoles n'est pas corrélée avec la culture qui y est semée. Il n'existe pas non plus de règles de rotations de cultures évidentes permettant de détecter une classe agricole à partir du semis de l'année précédente. Par ailleurs, l'application de filtres simples (filtre médian par exemple) n'est pas non plus efficace car l'effet sel-et-poivre est trop important. Les méthodes de classification orientée-objets sont alors les plus adéquates pour résoudre ce problème. Idéalement, les objets issus de la segmentation doivent correspondre aux parcelles agricoles ou à des groupes de parcelles semées de la même manière. La détermination de la classe à attribuer à chaque objet est réalisée à partir de deux méthodes différentes présentées au chapitre 2. Pour rappel, la méthode classique consiste à segmenter l'image et à appliquer une classification par Maximum de Vraisemblance sur les objets segmentés. La nouvelle méthode proposée consiste à calculer la probabilité *a posteriori* d'appartenance de chaque objet à chaque classe à partir des résultats de la classification par pixel obtenue à l'étape précédente.

6.1. La segmentation et l'attribution des classes aux objets

La segmentation a été réalisée sous le logiciel eCognition (Definiens ®) en faisant varier les paramètres de forme, couleur et d'échelle (*Scale Parameter*). Les facteurs de « forme » et de « couleur » fixés à 0,8 et 0,2 respectivement ont permis d'obtenir de meilleurs résultats de classification. Le « *Scale Parameter* » a été testé de 20 à 150 par intervalles de 5 (figure 2.32). Plus le paramètre est petit, plus les objets segmentés sont petits.

Les résultats montrent que la nouvelle méthode proposée pour l'attribution des classes aux objets est meilleure que la méthode classique (différence significative à 95% : $z = 23,7$). L'application de ce traitement post-classification améliore significativement ($z = 16,7$) les résultats issus de la classification par pixel (avec *Scale Parameter* = 55). L'indice kappa augmente de 0,5655 à 0,6192 alors que la précision globale croît de 5% (de 65,98% à 70,58%).

Cinq exemples de fazendas visitées sur le terrain permettent de visualiser l'apport de la segmentation pour la classification (fig. 2.33). La colonne de gauche correspond aux résultats de la classification par pixel. La confusion entre classes se traduit par un effet sel-et-poivre qui apparaît clairement. Les parcelles détectées en « soja+maïs » sont bruitées par des pixels des classes « soja+millet » et « soja+sorgho ». La méthode orientée-objet (colonne du milieu) élimine ce bruit.

¹ Selon Foody (2002), un seuil de précision globale de 85% est généralement recommandé. Cependant, cet auteur critique ce seuil en affirmant que le seuil de précision adéquat dépend aussi du nombre de classes, de données d'entraînement et de validation disponibles.

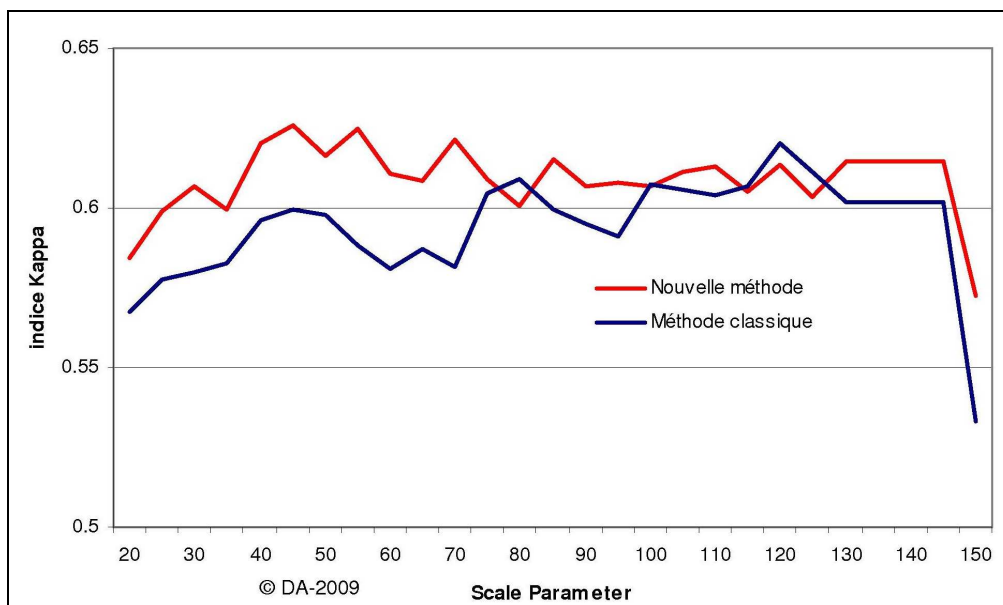


Figure 2.32 : Comparaison de l'indice Kappa obtenu à partir des deux méthodes d'attribution de classes pour différentes valeurs appliquées au facteur « Scale Parameter ».

6.2. Le regroupement de classes

La matrice de confusion (tableau 2.9) obtenue après l'application de la segmentation reste de qualité moyenne. Les classes « Soja+Coton » et « Coton » sont bien différenciées avec des taux d'erreur d'omissions et de commissions faibles. La classe « soja+maïs » présente également des résultats acceptables. Par contre, la confusion entre les classes « Soja », « Soja+Millet » et « Soja+Sorgho » demeure. La culture du millet et du sorgho en succession du soja a pour objectif principal de maintenir une couverture végétale sur les sols toute l'année. Cela permet de limiter l'érosion du sol tout en améliorant la productivité du soja semé en semis direct après la saison sèche. Etant donné les similitudes existantes entre ces cultures, il est possible de les regrouper dans une seule et même classe « soja+culture non commerciale ». Le regroupement peut se faire dès la phase d'entraînement ou après la réalisation de la classification réalisée avec six classes. Les deux possibilités sont testées et les résultats s'avèrent meilleurs en regroupant les classes en phase d'entraînement ($kappa = 0,675$ contre $kappa = 0,6525$) ($z = 23,1$) (tableau 2.10). Il existe quelques légères différences entre les classifications avec cinq ou six classes. Les Producer's Accuracy et User's Accuracy de la classe « soja+maïs » approchent à présent les 70% recommandés (Foody, 2002), ce qui valide le potentiel de détection de cette classe. Les classes « soja » et « soja+culture non commerciale » présentent également de meilleurs résultats mais restent toutefois inférieurs à 70%. La figure 2.34 illustre les améliorations apportées par le regroupement de classes pour les 5 fazendas déjà présentées auparavant. Les résultats finaux de la classification à l'échelle du Mato Grosso et pour la commune de Sorriso sont présentés en figure 2.35.

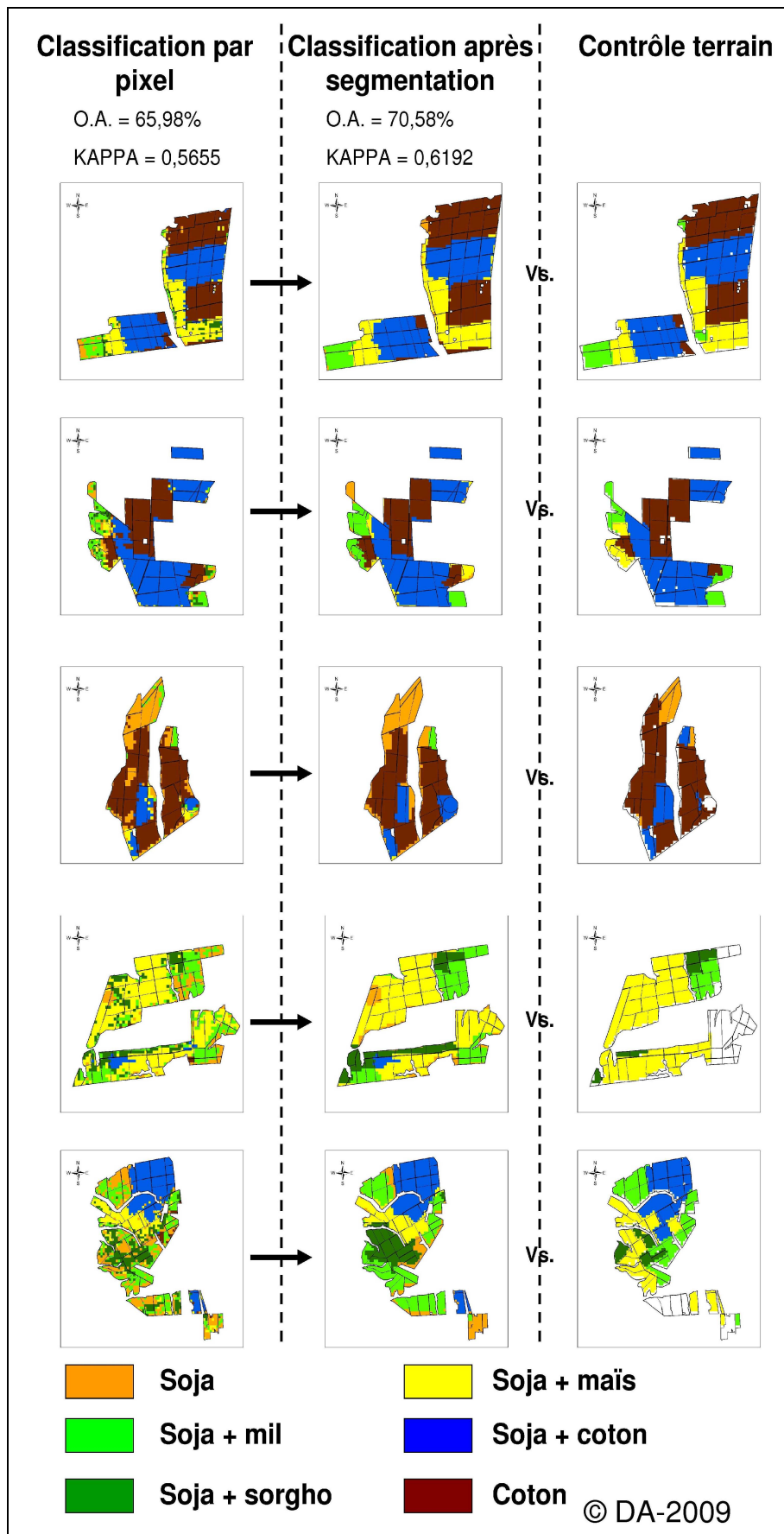


Figure 2.33 : Résultats des classifications avec six classes par pixel et après segmentation pour cinq fazendas au Mato Grosso.

		Terrain						Total
		Soja	Soja+millet	Soja+sorgho	Soja+maïs	Soja+coton	Coton	
Classification	Soja	726	561	146	655	152	231	2471
	Soja+millet	348	1994	39	1040	32	8	3461
	Soja+sorgho	58	321	451	1261	18	6	2115
	Soja+maïs	36	436	176	6411	773	29	7861
	Soja+coton	1	31	1	257	5225	126	5641
	Coton	66	13	1	89	399	2726	3294
	Total	1235	3356	814	9713	6599	3126	24843
	Producer's Accuracies	58.79%	59.42%	55.41%	66.00%	79.18%	87.20%	
	User's Accuracies	29.38%	57.61%	21.32%	81.55%	92.63%	82.76%	
	Overall Accuracy	70.58%						
KAPPA	0.6192							

Tableau 2.9 : Matrice de confusion de la classification par Maximum de Vraisemblance avec 13 dates MODIS en entrée et avec l'application d'une segmentation pour 6 classes.

		Terrain					Total
		Soja	Soja+culture non commerciale	Soja+maïs	Soja+coton	Coton	
Classification	Soja	64	17	5	0	10	96
	Soja+culture non	29	65	21	0	1	116
	Soja+maïs	2	16	69	8	0	95
	Soja+coton	0	1	3	85	2	91
	Coton	5	1	2	7	87	102
	Total	100	100	100	100	100	500
	Producer's Accuracies	64%	65%	69%	85%	87%	
	User's Accuracies	67%	56%	73%	93%	85%	
	Overall Accuracy	74%					
	KAPPA	0.675					

Tableau 2.10 : Matrice de confusion de la classification par Maximum de Vraisemblance avec 13 dates MODIS en entrée et avec l'application d'une segmentation pour 5 classes. La classe « Soja+Sorgho » est regroupée avec la classe « Soja+millet ».

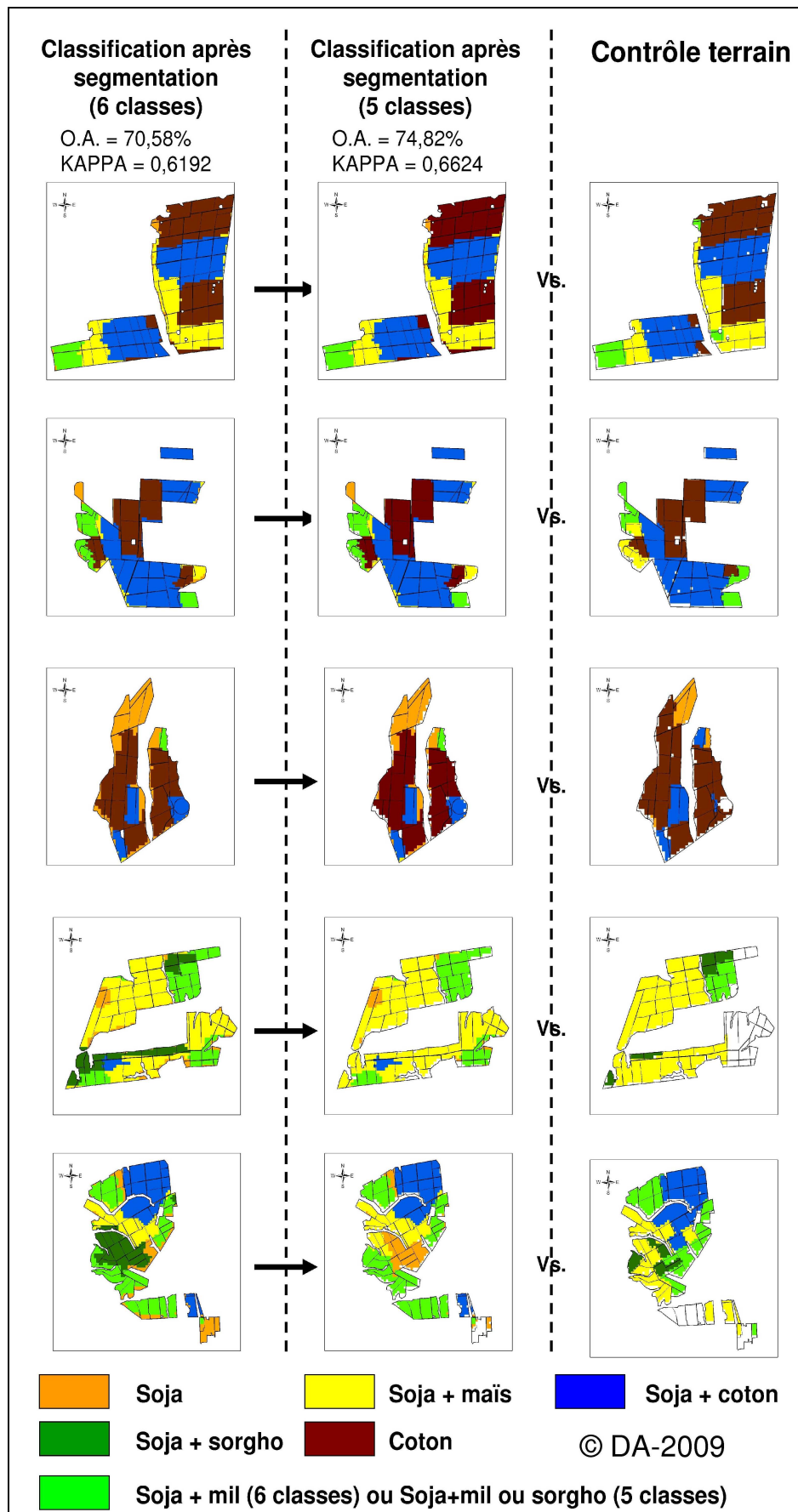


Figure 2.34 : Résultats des classifications après segmentation avec six et cinq classes pour cinq fazendas au Mato Grosso (O.A. = Overall Accuracy = Précision Globale).

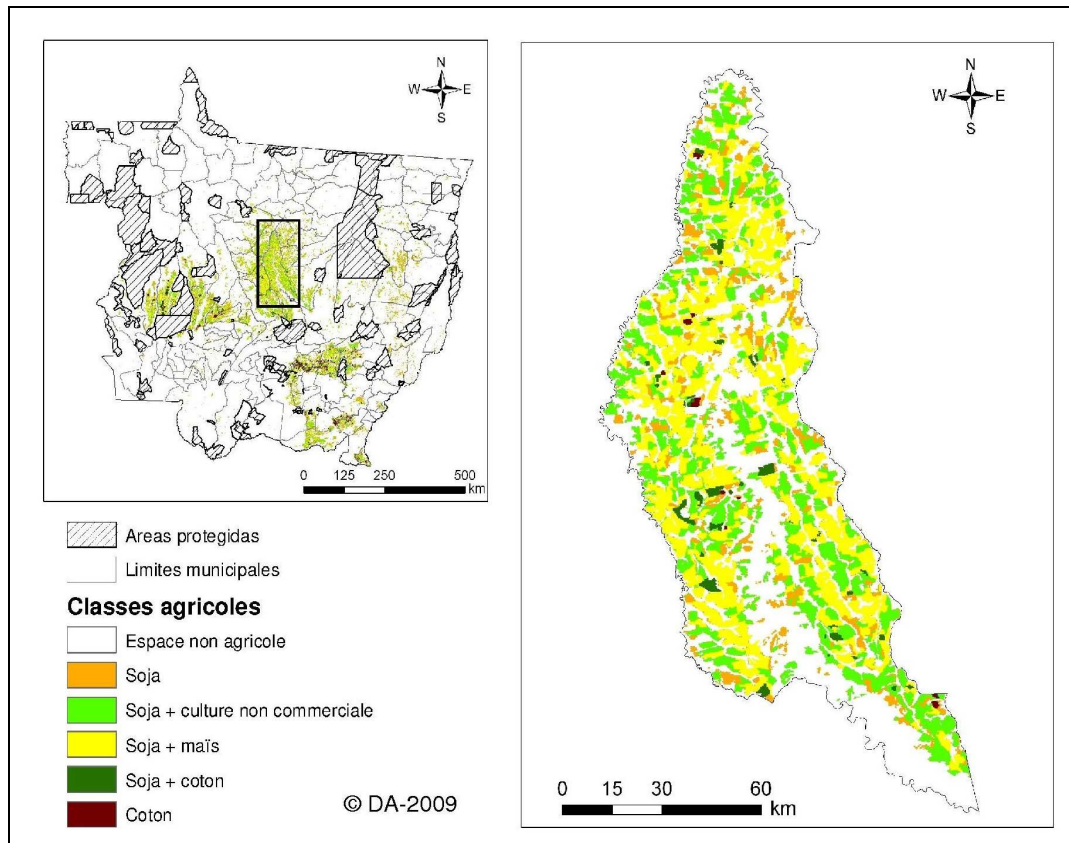


Figure 2.35 : Résultat de la classification en cinq classes au Mato Grosso et à Sorriso pour la récolte 2006-2007.

7. Validation de la classification

7.1. Validation à partir d'indicateurs de l'intensification agricole

La classification appliquée à cinq classes d'utilisation du sol est validée. Il s'agit à présent d'évaluer comment elle peut être utilisée pour l'étude de l'intensification agricole au Mato Grosso. Il s'agit de rechercher des indicateurs tels que la diversification, les systèmes de production en double cultures commerciales, la couverture permanente des sols et le semis direct. Pour cela, nous effectuons des regroupements que nous validons à l'aide de nouvelles matrices de confusion (avec 100 pixels choisis aléatoirement par classe) (tableau 2.11).

7.1.1. La diversification des cultures

Parmi les cinq classes d'utilisation du sol de la classification, trois cultures commerciales sont représentées : soja, maïs et coton. Les classes « soja » et « soja+culture non commerciales » peuvent donc être regroupées car elle ne représentent qu'une seule culture commerciale. On obtient alors une matrice de confusion sur quatre classes qui valide le potentiel de la méthodologie pour étudier la diversification au Mato Grosso (Précision Globale = 83,25% et Kappa = 0,7767)

7.1.2. Les systèmes de production en double cultures commerciales

Les double cultures semées successivement représentent un signal fort d'intensification puisque cela permet d'augmenter la production agricole par hectare. Nous séparons ici les classes « soja », « soja+culture non commerciale » et « coton » des classes « soja+maïs » et « soja+coton ». La précision globale (90,5%) et l'indice de Kappa (0,81) confirment que la classification est efficace pour détecter cet indicateur.

7.1.3. La couverture permanente des sols

La couverture permanente des sols durant la saison des pluies permet de mieux protéger les sols en limitant l'érosion. Indirectement, cela aide aussi à limiter la pollution des eaux par les engrais et pesticides utilisés. Nous avons donc séparé, d'une part, les classes « soja » et « coton » et, d'autre part, les classes « soja+culture non commerciale », « soja+maïs », « soja+coton ». Les résultats de la matrices de confusion sont satisfaisants (Précision globale = 86,5% et Kappa = 0,73) et valident donc la capacité de la classification pour détecter cet indicateur.

7.1.4. Le semis direct

Le semis direct ne concerne pas les classes incluant une culture de coton. En effet, le coton ne peut être semé en semis direct et ne peut servir de couverture du sol avant un semis direct. On considère que les classes « soja+culture non commerciale » et « soja+maïs » sont des pratiques culturales permettant la réalisation d'un semis direct du soja l'année suivante. Au contraire, lorsque aucune culture n'est semée après la récolte de soja, il est impossible de réaliser un semis direct l'année suivante. Les résultats (Précision globale = 78% et kappa = 0,56) indiquent que la classification est limitée pour détecter cette pratique culturale. Elle est donc abandonnée dans le reste de cette thèse.

		Soja	Soja+culture non commerciale	Soja+maïs	Soja+coton	Coton	Précision globale	Kappa
Diversification	Regroupements	1	2	3	4		83.2%	0,77
	Prod. Acc.	79%	77%	86%	91%			
	User's Acc.	72%	71%	97%	97%			
Double Culture commerciale	Regroupements	1	2		1		90,5%	0,81
	Prod. Acc.	95%	86%					
	User's Acc.	87%	95%					
Couverture des sols	Regroupements	1	2		1		86,5%	0,73
	Prod. Acc.	84%	89%					
	User's Acc.	88%	85%					
Semis direct	Regroupements	1	2	X			78%	0,56
	Prod. Acc.	65%	91%					
	User's Acc.	88%	72%					

Tableau 2.11 : Résultats des matrices de confusion obtenues pour les différents indicateurs de l'intensification agricole sélectionnés.

7.2. Validation avec les données IBGE

La validation de la classification à partir des données de terrain a montré des résultats satisfaisants pour la détection des cultures commerciales : coton, maïs et soja. Pour la détection des pratiques culturales incluant la présence ou l'absence d'une culture non commerciale en succession du soja, les résultats sont plus mitigés. Pour compléter la validation, il convient de comparer également les résultats obtenus avec les statistiques agricoles officielles calculées par l'IBGE. Ces comparaisons ne peuvent être réalisées que pour les trois principales cultures commerciales (l'IBGE ne calcule pas les superficies semées en millet ou en sorgho après le soja).

La validation est réalisée à partir des données de l'année 2005-2006. A l'échelle du Mato Grosso, la détection du soja est efficace. La différence entre les deux sources ne représente que 0,4% (23 548 ha) du total calculé par l'IBGE. Par contre, pour le maïs et le coton, la classification surestime les superficies de 21,1% et 17,3% respectivement (tableau 2.12).

Les écarts obtenus pour la culture du coton sont surprenants puisque, selon la matrice de confusion de la classification, cette culture était la mieux détectée (aussi bien en récolte principale qu'en deuxième récolte). Le problème est que la classification repère des parcelles de coton dans des communes où l'IBGE ne recense aucune culture de coton. C'est la somme de ces petites superficies repérées en coton qui fausse les résultats. En effet, lorsque que l'on ne considère que les plus grandes communes productrices de coton, les résultats sont plus cohérents. Selon l'IBGE, 95% de la superficie totale semée en coton au Mato Grosso se concentre sur 24 communes. En comparant les données de la classification et les données IBGE pour ces communes, la différence relative n'est que de 3,3% du total estimé par l'IBGE. Les fortes différences à l'échelle du Mato Grosso s'expliquent donc bien par les estimations erronées faites dans les petites communes productrices de coton. Dans le cas du maïs, même en ne considérant que les communes les plus importantes pour cette culture (32 communes représentent 95% de la production de maïs en deuxième récolte), l'écart relatif se maintient à 20,6% (surestimation de la classification). C'est donc un problème de confusion entre classes dans la classification qui est la source principale de ces différences (ce qui avait déjà été observé par l'étude de la matrice confusion).

	Soja (total)	Maïs (2ème récolte)	Coton (total)
IBGE	5 822 867	942 201	392 408
Classification MODIS	5 799 319	1 141 081	460 300
Différence absolue (Estimé-Observé)	-23 548	198 880	67 892
Différence relative	0.4%	21.1%	17.3%
Corrélations à échelle municipale	0,991	0,880	0,985
RMSE (ha)	11621	12512	1725

Tableau 2.12 : Comparaison des surfaces cultivées en soja, maïs (deuxième récolte) et coton au Mato Grosso pour la récolte 2005-2006.

A l'échelle communale, les coefficients de corrélations sont satisfaisants pour les trois cultures (supérieurs à 0,88) (tableau 2.12). La classification parvient donc à repérer correctement la répartition spatiale des cultures. Toutefois, ces bons résultats sont à relativiser par l'étude du RMSE. Celui-ci est particulièrement élevé pour le soja et le maïs (supérieur à 11000 ha) et traduit donc des problèmes d'estimation des surfaces cultivées en valeur absolue.

Mais, ces erreurs d'estimation ne sont pas réparties de manière homogène entre les communes. Le tableau 2.13 présente les résultats détaillés pour 5 communes : Sorriso, Sinop et Lucas do Rio Verde situées le long de la BR163 d'une part ; Campo Novo do Parecis et Sapezal localisées dans la Chapada dos Parecis d'autre part.

		Classification	IBGE	Différence absolue	Différence relative
Soja	Campo Novo do Parecis	339338	343301	-3963.5	-1%
	Sapezal	355550	376877	-21327	-6%
	Lucas do Rio Verde	216562.5	221906	-5343.5	-2%
	Sinop	85525	130326	-44801	-34%
	Sorriso	517138	582356	-65218.5	-11%
Maïs	Campo Novo do Parecis	52269	38000	14268.75	38%
	Sapezal	89250	75405	13845	18%
	Lucas do Rio Verde	154875	146248	8627	6%
	Sinop	24494	24685	-191.25	-1%
	Sorriso	197538	60500	137037.5	227%
Coton	Campo Novo do Parecis	25006	24874	132.25	1%
	Sapezal	50288	43778	6509.5	15%
	Lucas do Rio Verde	8912.5	7102	1810.5	25%
	Sinop	2644	500	2143.75	429%
	Sorriso	10856	7730	3126.25	40%

Tableau 2.13 : Comparaison des superficies cultivées estimées par la classification et l'IBGE pour 5 communes tests.

D'une manière générale, le classificateur sous-estime les superficies semées en soja. Les superficies semées en coton et en maïs sont par contre surestimées par la classification. Mais des différences régionales apparaissent et sont résumées dans les quelques remarques suivantes :

- 1- Les erreurs d'estimation des superficies semées en coton sont supérieures dans les communes situées le long de la BR163.
- 2- Les erreurs d'estimation des superficies semées en soja sont plus grandes à Sinop et à Sorriso que dans les autres communes testées.
- 3- Les erreurs d'estimation des superficies semées en maïs sont énormes à Sorriso alors qu'elles restent acceptables à Lucas do Rio Verde et à Sinop.

Pour essayer d'expliquer ces différences, nous pouvons émettre quelques hypothèses. Dans le cas du coton, les fortes différences relatives obtenues à Sinop, Sorriso et Lucas do Rio Verde s'expliquent surtout par les faibles superficies considérées (seulement 500 ha à Sinop selon l'IBGE par exemple).

En ce qui concerne le soja et le maïs, l'explication est plus complexe. Par exemple, comment expliquer que le classificateur détecte très bien le maïs à Sinop et à Lucas do Rio Verde alors qu'il est inefficace à Sorriso. Les missions de terrain n'ont pas permis de repérer des différences significatives de pratiques culturales entre ces communes qui pourraient expliquer rationnellement ces écarts de classification. En supposant alors que la classification des données satellitaires est spatialement homogène entre ces trois communes limitrophes, l'hétérogénéité spatiale des erreurs d'estimation ne peut à priori s'expliquer que par les données de l'IBGE. A Sorriso, l'IBGE recense 60500 ha de maïs en 2005-2006 alors que la classification détecte 197000 ha. Selon le Secrétariat de l'Environnement et de l'Agriculture de Sorriso, il y avait déjà 63000 ha de maïs (en succession du soja) sur la commune en 2003-2004. Le président du Syndicat Rural de Sorriso estimait quant à lui que cette superficie

atteindrait les 200000 ha en 2007-2008. On peut donc émettre des doutes sur la qualité de l'estimation faite par l'IBGE.

Pour les superficies semées en soja, le constat est le même : comment expliquer que le classificateur fonctionne moins bien à Sinop et à Sorriso ? Ici aussi, il convient de s'interroger sur la qualité des données fournies par l'IBGE. On peut par exemple se demander si les méthodes de collecte adoptées par l'IBGE peuvent tenir compte des limites administratives communales. Les communes de Sinop et Sorriso sont deux centres économiques importants pour la filière agricole (Sorriso est la première commune productrice de soja du Brésil et Sinop est considérée comme la capitale du nord du Mato Grosso). Ainsi, de nombreuses multinationales sont installées sur ces communes et certaines négociations agricoles sont menées par des producteurs qui en fait sèment dans les communes voisines. Par exemple, de nombreux producteurs rencontrés sur le terrain habitent à Sorriso et financent leur récolte auprès des entreprises de Sorriso tandis que leurs fazendas se trouvent en fait dans les communes voisines. Ainsi, si les estimations de l'IBGE sont faites à partir d'entretiens avec des acteurs locaux, on peut se demander comment ces cas particuliers (mais pas rares) sont pris en compte. La situation dans les communes de la Chapada dos Parecis est différente puisque qu'il n'existe pas d'axe de communication économiquement important tels que la BR163 dans cette région. De plus, la terre indigène Utiariti se trouve entre les deux communes ce qui complique la création de liens économiques et sociaux forts (la route n'est pas asphaltée sur 50 kilomètres et les indiens font payer une taxe pour traverser leur territoire). Pour ces raisons, la plupart des producteurs de ces communes habitent et travaillent dans la même commune, ce qui facilite les estimations faites par l'IBGE.

Pour valider la classification, il importe également d'évaluer sa capacité à capter les tendances d'évolution des surfaces semées sur la période d'étude (2000-2007). La classification a donc été appliquée à toutes les données MODIS/TERRA EVI téléchargées afin de sortir des cartes agricoles depuis l'année 2000-2001 jusqu'à 2005-2006.

A l'échelle du Mato Grosso, les taux de croissance annuels des principales cultures mesurés par l'IBGE sont bien représentés par la classification (tableau 2.14). Celle-ci parvient à détecter une forte évolution des surfaces semées en maïs (+23,7%/an selon l'IBGE contre +27,4%/an selon la classification) et en soja (+14,4%/an contre +10,7%/an) tandis que la culture du coton a stagné (-0,8%/an contre +2,3%/an).

Ceci est confirmé par la figure 2.36 qui présente des évolutions de superficies très proches pour le soja et le maïs entre les données IBGE et la classification. Pour la culture du coton, il existe une forte différence entre les deux sources de données en 2003 (290 000 ha selon IBGE contre 478 000 ha selon la classification). Ce problème est notamment marquant dans quelques communes du sud-est de l'Etat où l'IBGE ne recense pas de culture de coton tandis que la classification en détecte beaucoup (plus 27 000 ha à Barra do Garças par exemple). Les séries temporelles de EVI de ces parcelles détectées comme coton ressemblent effectivement plus à des profils de culture de coton que de soja (fig. 2.37) donc il est difficile d'incriminer le classificateur. Dans cette région du Mato Grosso, le soja est semé plus tardivement que dans les autres régions. Ceci s'explique par la saison des pluies qui débute plus tard et par le fait que le soja qui y est cultivé est souvent destiné à créer des semences (ce qui implique des pratiques culturelles légèrement différentes). Ainsi, les séries temporelles de EVI sont décalées et se confondent avec les séries temporelles de la classe « coton », entraînant des erreurs de classification.

	IBGE		
	2000-2001	2005-2006	Taux de croissance annuel
Soja	3121408	5822867	14.4%
Maïs (2ème récolte)	428538	936357	23.7%
Coton (total)	412627	392408	-0.8%

	Classification		
	2000-2001	2005-2006	Taux de croissance annuel
Soja	3525613	5799319	10.7%
Maïs (2ème récolte)	481000	1141081	27.4%
Coton (total)	403475	460300	2.3%

Tableau 2.14 : Comparaison des taux de croissance annuels des superficies cultivées en soja, maïs (2^{ème} récolte) et coton au Mato Grosso à partir des données de l'IBGE et des données issues des classifications d'images MODIS TERRA/EVI.

Plus généralement, cela traduit en fait un manque de robustesse de la méthode de classification. Le choix des dates les plus pertinentes pour la classification rend la méthode dépendante des calendriers agricoles. Or ceux-ci varient légèrement entre chaque région. Cependant, ce problème doit être relativisé car il est surtout détecté pour l'année 2002-2003. Les autres années sont classifiées de manière plus pertinente. Il semblerait en fait que le semis de soja en 2002-2003 ait été effectué plus tard que d'habitude (pas de raison connue) ce qui aurait augmenté la confusion avec la classe coton et par la même le nombre de pixels mal classifiés.

A l'échelle communale, les coefficients de corrélation entre les données issues de la classification et les données IBGE pour les six années de données disponibles sont bons :

- entre 0,972 et 0,993 pour le soja,
- entre 0,914 et 0,988 pour le coton (l'année la plus problématique étant 2002-2003 déjà évoquée auparavant),
- entre 0,894 et 0,942 pour le maïs.

Ainsi, même si les superficies calculées doivent être considérées avec un regard critique, la classification permet de repérer les communes qui se sont engagées vers un processus de diversification des cultures. Elle permet donc de spatialiser l'intensification agricole.

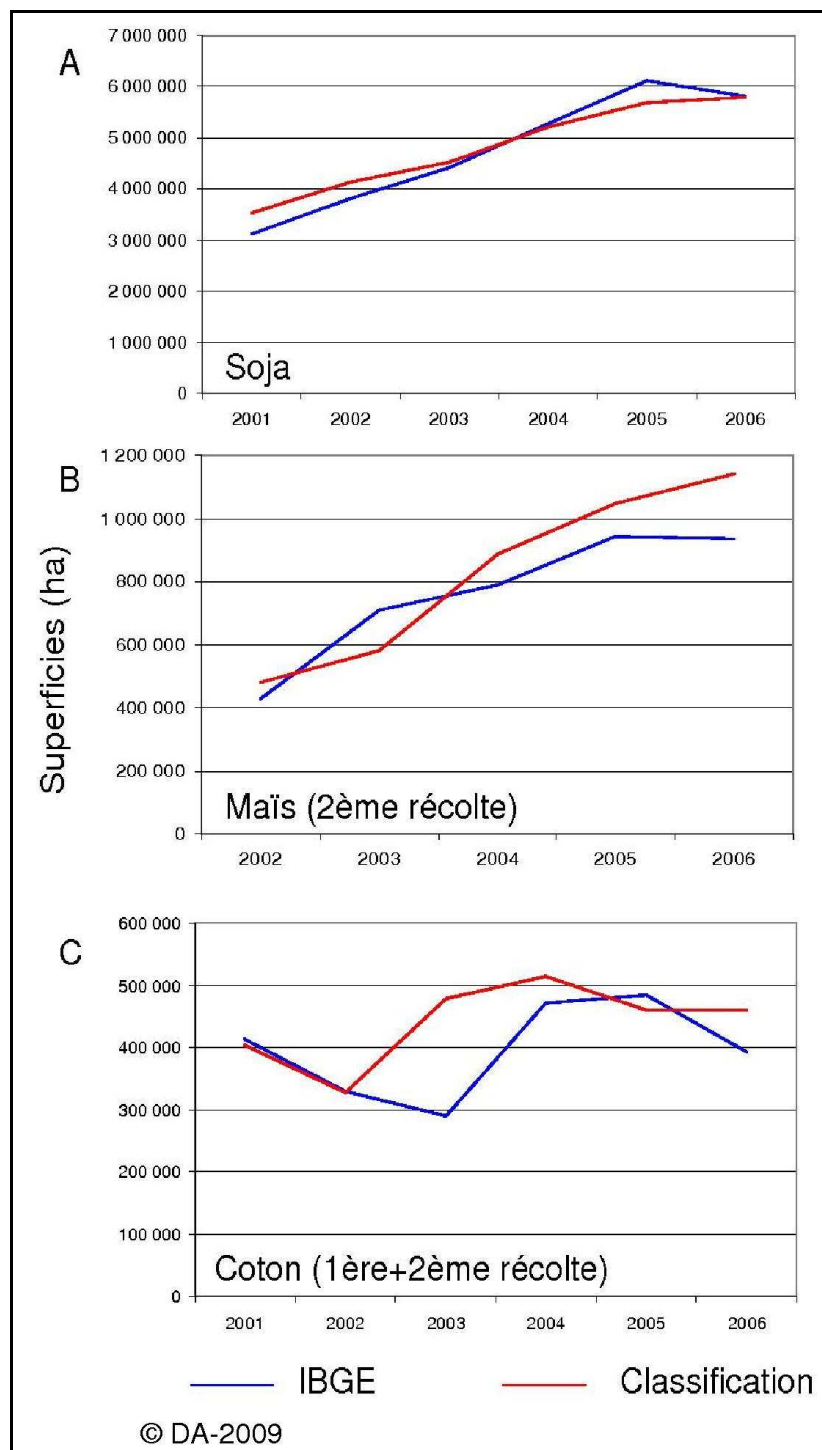


Figure 2.36 : Comparaison de l'évolution des superficies semées en soja (A), maïs (2^{ème} récolte) (B) et coton (1^{ère} + 2^{ème} récolte) (C) au Mato Grosso.

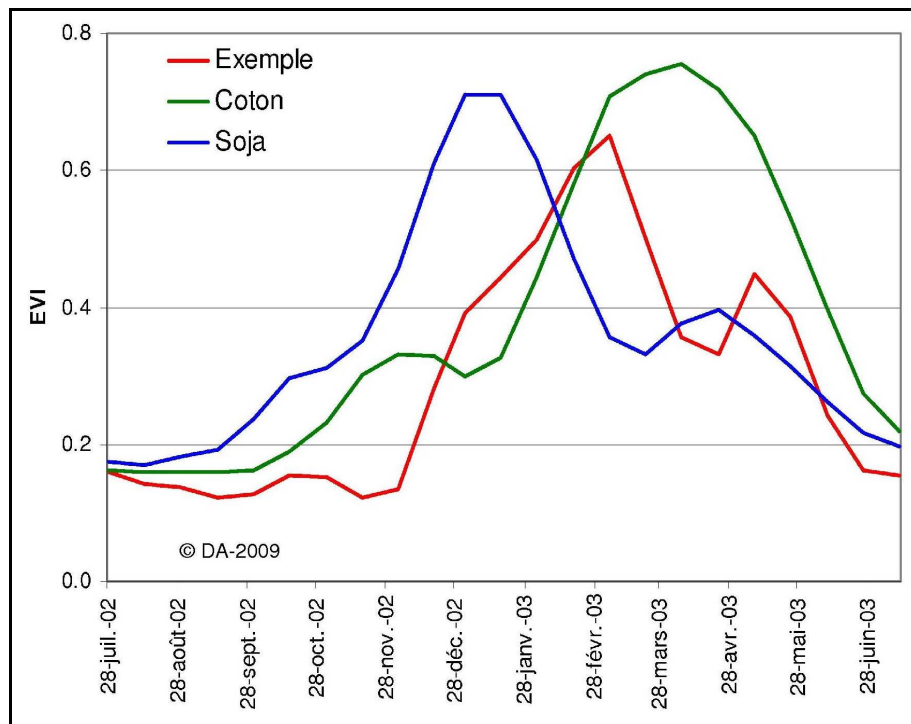


Figure 2.37 : Exemple de profil temporel de EVI d'un pixel mal classifié comme coton à Barra do Garças et comparaison avec les profils moyens des classes coton et soja.

8. Conclusion

La détection des cultures au Mato Grosso s'établit à partir de deux classifications successives de séries temporelles d'images MODIS/TERRA EVI. La première classification a pour but de distinguer les surfaces agricoles des autres formes d'utilisation du sol. La deuxième classification doit discriminer les principales cultures et pratiques culturales implantées au Mato Grosso. Ces deux classifications sont organisées selon un même processus en cinq étapes : analyse des séries temporelles de EVI des classes recherchées, lissage des séries temporelles, réduction de la dimensionnalité des données d'entrée, choix d'un classificateur et traitement post-classification. Les deux classifications finales sont enfin croisées pour obtenir une carte des cultures au Mato Grosso. Cette méthodologie est résumée en figure 2.38.

Les résultats de la classification sont validés avec les données de terrain et les données officielles fournies par l'IBGE. Les estimations s'avèrent fiables pour les principales cultures telles que le soja, le maïs et le coton. Pour les classes de « Soja » et « Soja+culture non commerciale », les estimations ne sont pas satisfaisantes du fait de la forte confusion existant entre ces séries temporelles. Pour résoudre ce problème, l'utilisation de données avec une résolution temporelle plus fine peut être envisagée. Les données journalières sont à écarter car la forte couverture nuageuse risque de limiter son intérêt étant donné qu'elle pose déjà problème sur des compositions de 16 jours. Par contre, les données MODIS EVI de la version 5 proposent des images de EVI tous les 8 jours avec la même qualité que les compositions temporelles de 16 jours. En effet, les données MODIS/TERRA et AQUA de la version 5 sont décalées d'une demi période dans le temps, i.e. la composition de 16 jours calculée par MODIS/TERRA commence au milieu de la composition de 16 jours calculée par MODIS/AQUA (Didan et Huete, 2006). Ces données n'ont pas pu être correctement exploitées dans cette thèse car la version 5 n'est disponible que depuis janvier 2007.

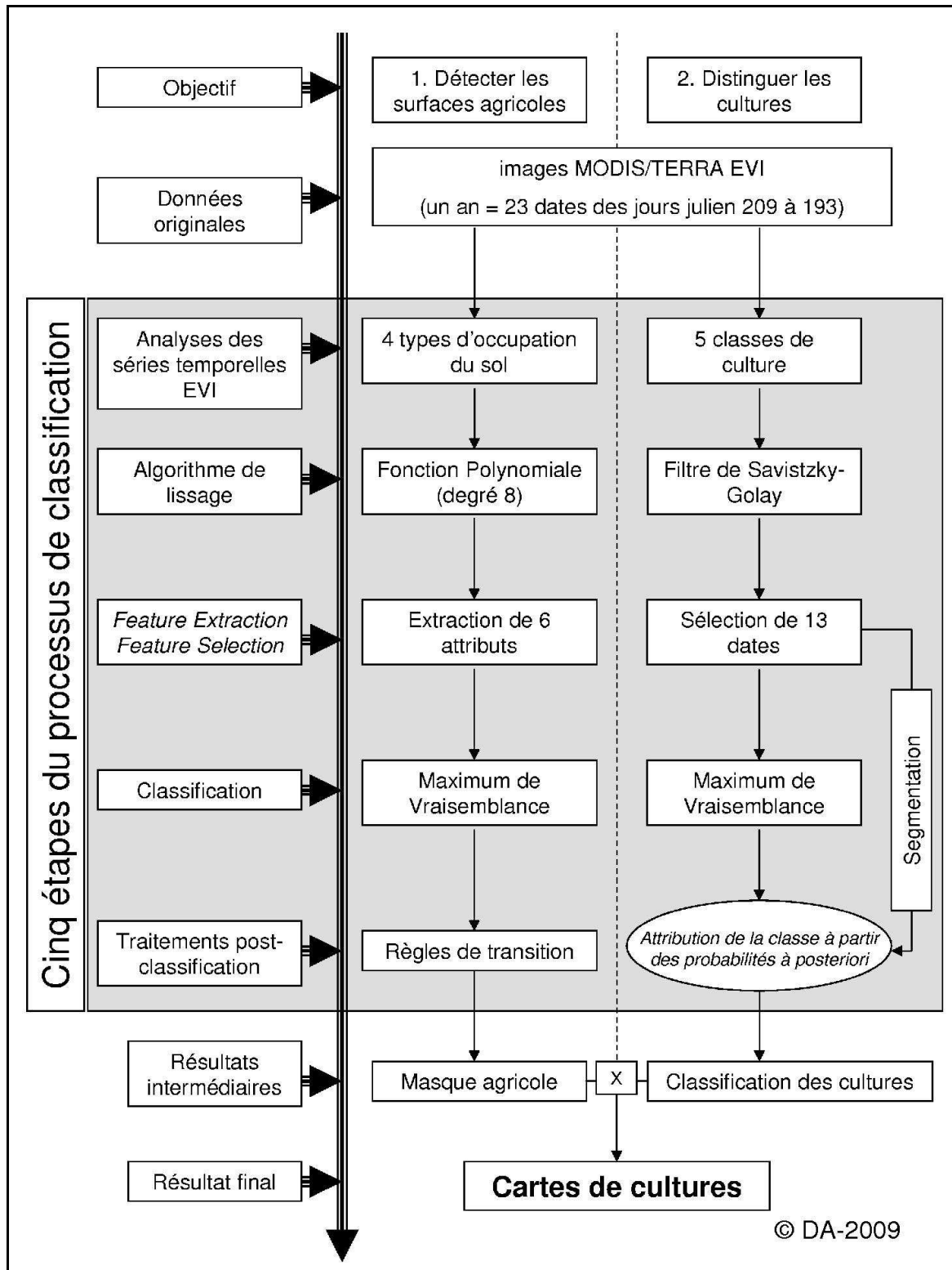


Figure 2.38 : Présentation de la méthode de classification appliquée pour cartographier les cultures à partir des données MODIS/TERRA EVI.

Par ailleurs, la forte confusion existant entre ces deux classes (« soja » et « soja+culture non commerciale ») est probablement liée à deux facteurs :

- la fiabilité des données récoltées sur le terrain : il est possible que certaines personnes déclarent semer du sorgho ou du millet car elles savent que ces pratiques sont conseillées par les instituts de recherche. Toutefois, selon les conditions propres à chaque récolte (manque de temps ou de ressources financières), cette pratique n'est pas toujours applicable, ou alors seulement sur une partie de la fazenda ou des parcelles. Ainsi, des améliorations de classification pourraient être obtenues en testant les échantillons de terrain de ces classes utilisés pour la classification. Il s'agirait de détecter les échantillons de terrain anomalies, i.e. les pixels présentant des séries temporelles de EVI trop différentes du reste de la classe. Ceci peut être réalisé par le calcul de la distance de Mahalanobis (Penny et Jolliffe, 2001 ; Ben Gal, 2005 ; Arvor *et al.*, 2008).

- la forte variabilité intraclasse existant dans les classes « soja » et « soja+culture non commerciale » se traduit par un fort gradient des valeurs de EVI. Il s'étend d'un sol nu dans le cas d'un soja non suivi d'une culture à une forte présence de végétation dans le cas d'un semis de sorgho ou de millet semé. La situation effectivement rencontrée sur le terrain se situe entre ces deux extrêmes (un semis de millet mal réalisé ou trop tardif peut se développer moins bien que certaines plantes adventices ou des repousses de soja). Etant donné que la qualité de la protection du sol est corrélée avec la densité du couvert végétal, on peut alors se demander si une classification discrète est adaptée pour représenter cette présence végétative. Une classification floue pourrait s'avérer plus performante.

De plus, cette étude met en avant le manque de données statistiques agricoles fiables pouvant être utilisées pour la validation. Les données de l'IBGE sont utilisées mais de fortes critiques peuvent y être apportées. Ainsi, la classification objective issue des images satellitaires doit être perçue comme un complément aux données de l'IBGE afin d'améliorer la qualité des statistiques agricoles. Celles ci sont très importantes pour de nombreuses raisons pratiques : les estimations de surfaces cultivées sont nécessaires pour prévoir les productions agricoles utiles à la régulation des cours du soja, l'Etat reverse des sommes d'argent (récoltées en imposant les producteurs) à chaque commune en fonction des superficies cultivées¹...

Enfin, les résultats de la classification sont inférieurs à ceux obtenus par Galford *et al.* (2008) ou Brown *et al.* (2007) qui ont détecté les parcelles semées en simple ou double cultures commerciales au Mato Grosso. Toutefois, ces auteurs n'ont considéré que des régions très petites (une commune voire une fazenda située sur la Chapada dos Parecis) tandis que nous tentons ici de cartographier tout le Mato Grosso. Etant donné la taille de cet Etat, il existe une certaine variabilité des calendriers agricoles qui complique la classification des séries temporelles et constitue la principale limite de la méthode. Certaines améliorations pourraient donc être apportées à l'avenir en réglant les paramètres de la classification (choix des images notamment) en fonction de la localisation des pixels et de la saison des pluies correspondante.

¹ Ce point peut d'ailleurs expliquer en partie les incertitudes liées à l'utilisation des données IBGE. Les acteurs locaux interrogés peuvent avoir tendance à surestimer volontairement les statistiques agricoles sur leur commune pour toucher plus de recettes. Ce point a notamment été soulevé en 2005 par le gérant de l'institut de recherche AgroNorte de Sinop. Celui-ci s'étonnait de voir que les chiffres de l'IBGE indiquaient une région de production de riz dans l'état du Maranhão dont il n'avait pas connaissance. Il a dû envoyer une personne sur le terrain qui a démenti la présence de ces productions.

Synthèse de la Partie 2

L'expansion des cultures de soja et, plus généralement la progression du front pionnier, a entraîné de nombreux changements d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie et surtout au Mato Grosso. La télédétection permet un suivi efficace de ces changements, notamment à travers l'utilisation des indices de végétation. Les données basse et haute résolutions ont régulièrement été utilisées pour cartographier les couverts végétaux et leurs évolutions spatiotemporelles aux échelles globales, régionales ou locales. De nombreux auteurs ont notamment dirigé leurs efforts vers le suivi de la végétation naturelle et la détection des parcelles défrichées dans les régions tropicales et surtout en Amazonie.

Outre le suivi des couverts végétaux naturels, la télédétection offre de nombreux avantages pour la cartographie des cultures et des pratiques culturales. Dans ce domaine, les recherches se sont surtout orientées vers la détection des systèmes de production en doubles cultures. Les travaux de Brown *et al.* (2007) et Galford *et al.* (2008) au Mato Grosso ont notamment donné des résultats encourageants à une échelle locale.

Pour réaliser ce type d'étude, les séries temporelles de données MODIS TERRA/EVI, de par leur résolution spatiale de 250 m et temporelle de 1 à 2 jours, apportent des améliorations pour un travail à l'échelle régionale. Ces séries s'avèrent notamment intéressantes car elles permettent de discriminer les couverts végétaux en fonction de leurs cycles phénologiques. Nous venons de valider une méthodologie de classification rigoureuse basée sur six étapes successives : (1) Analyse des séries temporelles de EVI ; (2) Lissage des séries temporelles de EVI ; (3) Sélection de variables ou extraction d'attributs à partir des séries temporelles de EVI ; (4) Choix d'un classificateur ; (5) Amélioration de la classification par application de filtres ou approche orientée-objets ; et (6) Validation de la classification.

L'originalité de la méthode réside surtout dans la phase d'amélioration de la classification par une approche orientée-objets. Cette méthode est originale pour deux raisons : (i) les données MODIS ont à ce jour été peu utilisées pour la segmentation et (ii) le critère d'attribution des classes aux objets est basé sur la probabilité d'appartenance des pixels à chacune des classes recherchées.

Dans cette thèse, deux classifications successives sont réalisées. Dans un premier temps, il s'agit de différencier les surfaces agricoles des autres couverts végétaux. Les résultats sont satisfaisants puisque 94,91% des parcelles cultivées répertoriées lors des missions de terrain ont été détectées par la méthode proposée. Dans un deuxième temps, cinq classes de cultures sont recherchées : « soja », « coton », « soja+culture non commerciale », « soja+maïs » et « soja+coton ». Ces classes représentent les principales cultures commerciales semées au Mato Grosso (soja, coton et maïs) et les principales pratiques culturales adoptées par les producteurs matogrossenses (systèmes de production en simple ou double cultures commerciales). La classification donne des résultats satisfaisants puisque la précision globale est de 74,82% ($K = 0,675$). Elle peut donc être employée pour quantifier et qualifier les changements d'occupation et d'utilisation du sol au Mato Grosso et donc cartographier le front pionnier et sa dynamique.



Sorriso (2007) : « Aidez à préserver, dénoncez les infractions ». L'expansion des cultures de soja est un facteur de déforestation au Mato Grosso, mais la préservation de l'environnement est un enjeu capital pour le développement futur de la région. © DA-2009

Partie 3 : Le soja au coeur de la dynamique du front pionnier matogrossense

Introduction de la Partie 3

Chapitre 8. Données et méthodes pour la cartographie des fronts pionniers

Chapitre 9. Cartographie des fronts d'ouverture, économique et d'intensification

Chapitre 10. La dynamique des fronts pionniers

Synthèse de la Partie 3

Introduction de la Partie 3

La télédétection représente un outil indispensable pour la quantification et la localisation des changements d'occupation et du sol. Toutefois, les images satellites n'apportent pas d'informations directes sur les processus amenant ces changements. Dans ce sens, la télédétection est une aide à la compréhension des changements d'occupation et d'utilisation du sol. Les conclusions et interprétations issues des classifications de séries multi-temporelles MODIS TERRA/EVI sont donc aussi importantes que la qualité de la classification. Dans cette thèse, l'interprétation des classifications doit permettre (i) d'effectuer un suivi de l'avancée du front pionnier au cours de la période 2000-2007 et (ii) d'évaluer le rôle joué par la dynamique du soja dans la progression du front pionnier.

Une telle étude nécessite d'appliquer une méthodologie rigoureuse qui est présentée dans le premier chapitre de cette partie. Celle-ci s'articule autour de quatre points : (i) l'intégration des résultats des classifications avec d'autres données (cartes de déforestation et de végétation), lesquelles doivent donc être présentées et validées ; (ii) le choix d'une échelle spatiale cohérente (échelle régionale et/ou locale) pour l'observation et la compréhension des dynamiques spatiales ; (iii) le choix d'un mode de représentation explicite ; et (iv) la détermination de variables pertinentes pour le suivi de la progression du front pionnier matogrossense et de l'évaluation de l'influence de la dynamique du soja sur cette progression .

Dans le deuxième chapitre de cette partie, ces variables sont calculées afin de présenter l'évolution séparée de chaque front composant le front pionnier, i.e. le front d'ouverture, le front économique et le front d'intensification. Les deux derniers fronts permettent notamment d'observer l'évolution des territoires du soja.

Dans le troisième chapitre, les variables sont mesurées pour évaluer l'importance des interrelations entre fronts. Il s'agit ainsi de déterminer (i) l'impact de l'expansion agricole sur la déforestation, (ii) l'impact de l'intensification agricole sur l'expansion agricole et, par conséquent, (iii) l'impact de l'intensification agricole sur la déforestation. Enfin, ces conclusions permettent de proposer un essai de cartographie du front pionnier et de régionalisation des territoires du soja au Mato Grosso.

Chapitre 8. Données et méthodes pour la cartographie du front pionnier

1. Introduction

L'étude du front pionnier s'appuie sur le suivi de fronts successifs (ouverture, économique et intensification) qui impliquent l'utilisation combinée de plusieurs données géographiques (classifications d'images MODIS TERRA/EVI, cartes de déforestation, cartes de végétation). L'emploi de données différentes pose le problème de leur validation et de la méthodologie à appliquer.

Ce premier chapitre présente les différentes cartes utilisées en mettant l'accent sur les données de déforestation et les cartes de végétation. Etant donné que ces données sont disponibles auprès de différentes sources, nous les critiquons afin de valider leur utilisation pour la suite de l'étude. La méthodologie appliquée pour suivre l'évolution des fronts composant le front pionnier et étudier leurs interrelations est alors présentée. Cette méthodologie est basée sur le calcul d'indicateurs issus des cartes d'occupation du sol qui permettent de définir : (i) les stades d'évolution des fronts de manière indépendante, (ii) les dépendances entre fronts et (iii) les stades d'évolution du front pionnier permettant de régionaliser les territoires du soja au Mato Grosso.

2. Présentation des données utilisées

2.1. Les données agricoles

Les cartes agricoles réalisées à partir des données MODIS TERRA/EVI sont utilisées. La méthodologie appliquée pour leur réalisation est celle présentée dans la partie 2 de cette thèse. La période étudiée couvre sept récoltes, de la récolte 2000-2001 à 2006-2007.

2.2. Les cartes de végétation naturelle au Mato Grosso

Dans le cadre de l'étude de la dynamique du soja et de la déforestation au Mato Grosso, il est essentiel de déterminer dans quel biome se produisent les changements d'occupation du sol. Cela est important car les lois du code forestier (taille de la réserve légale) sont différentes selon les biomes considérés (voir Partie 1 – Chapitre 1). De plus, étudier l'expansion agricole par biome permet de critiquer les arguments avancés par les différents acteurs concernés. Les producteurs affirment par exemple que le soja n'est pas un vecteur de déforestation car il est cultivé en région de *cerrado*. Au contraire, les environnementalistes dénoncent l'impact de cette culture sur la forêt et sur le *cerrado*, ce dernier étant trop peu protégé.

Il s'agit donc ici de différencier notamment les espaces de *cerrado* et les espaces de forêts. Pour cela, deux possibilités existent :

1. il est possible de recréer une carte de végétation forêt-cerrado à partir des cartes de déforestation issues du projet PRODES (voir paragraphe 2.3 de ce chapitre) puisque celles-ci ne prennent en compte que le biome forestier ;

2. il est possible de se baser sur une carte de végétation du Mato Grosso produite par la SEMA/PRODEAGRO¹ (fig. 3.1).

La carte réalisée dans le cadre du PRODEAGRO est considérée comme étant la plus précise à ce jour (Durieux, 2002). Elle a d'ailleurs été reprise par Anderson (2004) qui l'a utilisée comme référence d'entraînement et de contrôle afin de cartographier la végétation dans cet Etat à partir des données MODIS. De plus, cette carte est plus précise (onze classes sont présentées) que celle issue du projet PRODES. Elle pose cependant la question de la délimitation entre *cerrado* et forêt. Elle inclut notamment une classe « contact cerrado-forêt ombrophile » qui est difficile à définir. Selon la légende du projet RADAMBRASIL (1982), cette classe correspond à des enclaves de savane arborée dense dans le domaine de la forêt ombrophile ouverte. Elle est donc majoritairement composée de forêt. Pour cette raison, nous avons choisi de la reclasser en forêt.

Les cartes de végétation dérivées du projet PRODES et du projet PRODEAGRO présentent quelques différences mais restent très proches (fig. 3.2). La carte du PRODEAGRO est choisie pour sa précision et pour le fait qu'elle s'appuie directement sur des classes de végétation (au contraire de la carte issue du PRODES qui est créée indirectement à partir des cartes de déforestation).

¹ Cette carte a été réalisée à la fin des années 1980 dans le cadre d'un Programme de Développement Agro-Environnemental (PRODEAGRO) financé par la Banque Mondiale et qui prévoyait l'élaboration d'un zonage agro-écologique du Mato Grosso. Cette carte se base sur le projet RADAMBRASIL mais à une échelle de 1:1500000 (Carreiras *et al.*, 2006b).

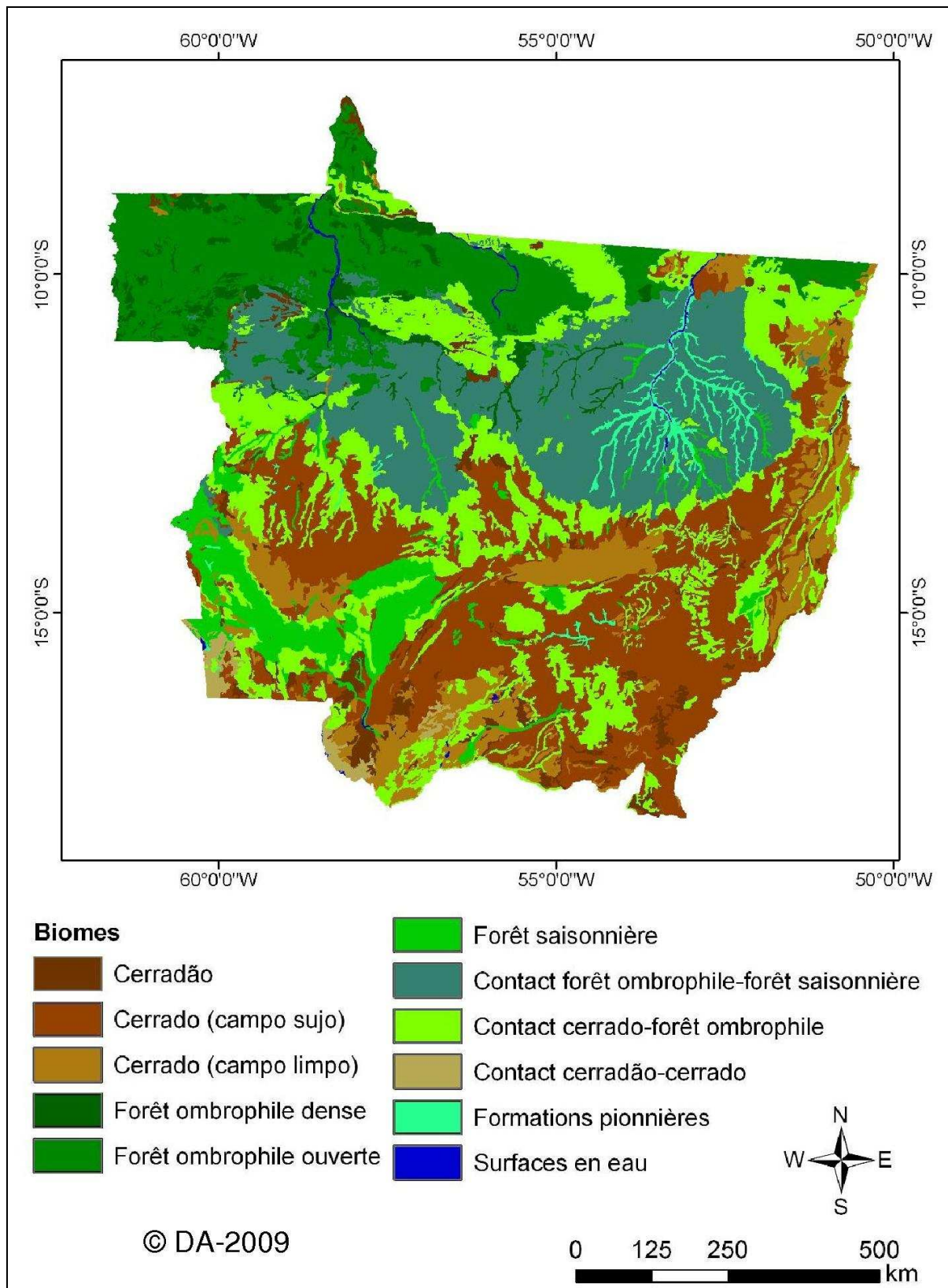


Figure 3.1 : Carte de végétation potentielle du Mato Grosso (Source : PRODEAGRO/FEMA-MT).

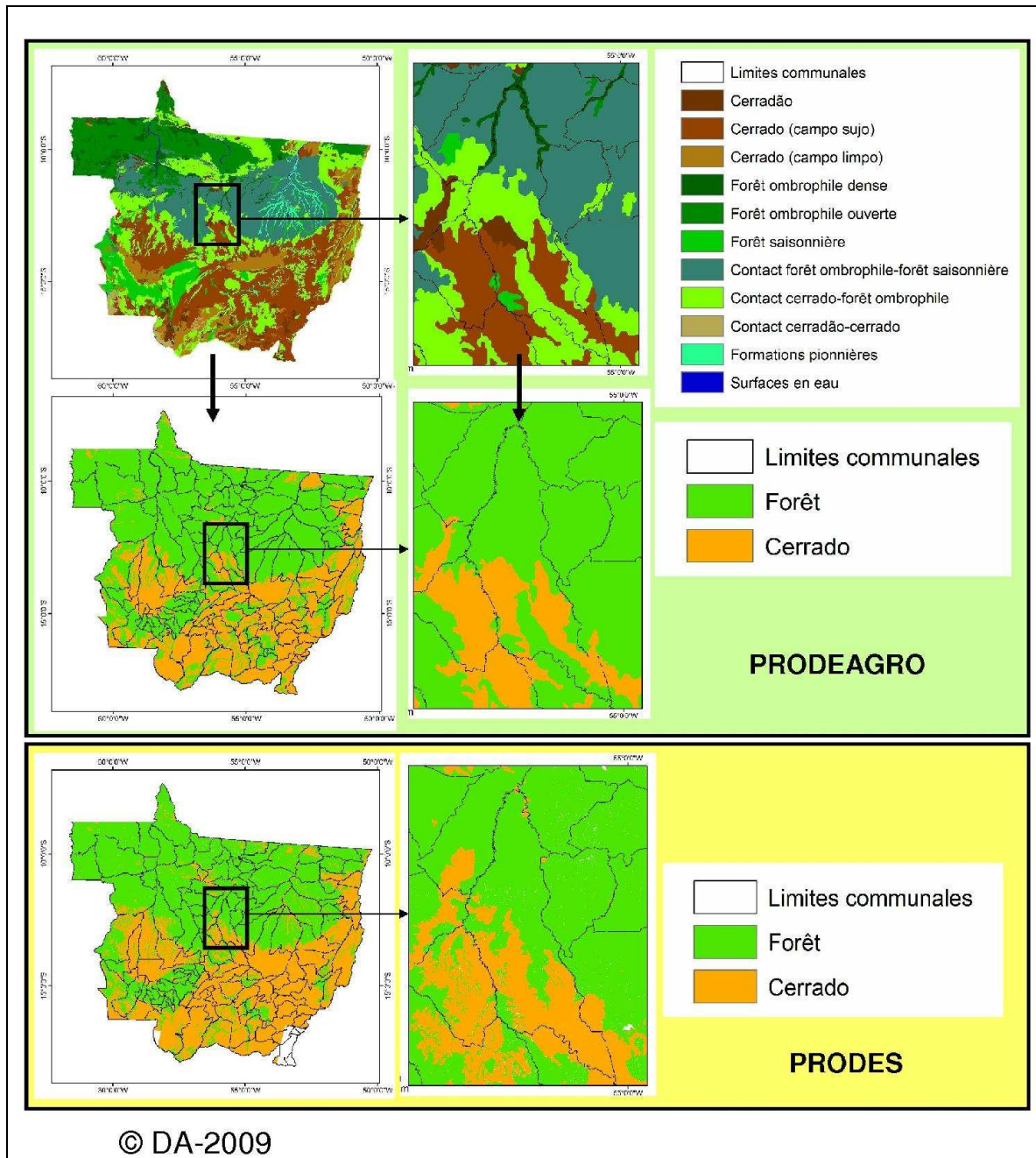


Figure 3.2 : Comparaison des cartes de végétation forêt-cerrado obtenues à partir des données PRODES et PRODEAGRO, au Mato Grosso et à Sorriso.

2.3. Les données de déforestation

Comme il a été présenté auparavant dans cette thèse (Partie 2- chapitre 1), plusieurs organismes estiment la déforestation en Amazonie. Les estimations de déforestation fournies par l'INPE sont généralement considérées comme étant la référence. Ces données sont calculées annuellement depuis 1988 à partir d'images Landsat mais le processus n'a été automatisé qu'en 1997. Cela permet tout de même de profiter de données présentant une certaine homogénéité sur notre période d'étude. Les cartes de déforestation entre 2000 et 2006 ont donc été acquises auprès de l'INPE. Cependant, celles-ci ne recensent que les déboisements repérés en biome forestier. Or, le Mato Grosso est caractérisé par une forte présence de *cerrado* (environ 320000 km², soit plus du tiers de la superficie de l'Etat). Ce fait

est dommageable dans le cas d'une étude sur la dynamique du soja et de ses impacts environnementaux car ceux-ci diffèrent selon le biome dans lequel les cultures sont installées (biodiversité différente, émissions de carbone différentes...).

Par ailleurs, l'organisation non-gouvernementale IMAZON a mis en place un Système d'Alerte au Déboisement (SAD) qui produit des cartes de déforestation mensuelles au Mato Grosso depuis août 2006 et au Para depuis août 2007. Comme les données PRODES, les cartes de l'IMAZON ne prennent en compte que le biome forestier. La méthode est basée sur un modèle de démixage spectral appliqué aux images MODIS. Ce modèle calcule le pourcentage de végétation et de sol contenus dans chaque pixel¹. Une comparaison de ces pourcentages sur deux images successives avec un intervalle de 16 jours permet de détecter les changements d'occupation du sol. Un pixel est considéré comme déboisé lorsque le pourcentage de végétation baisse de plus de 25% tandis que le pourcentage de sol augmente de plus de 15% (Souza Jr *et al.*, 2008).

Enfin, le Secrétariat de l'Environnement de l'Etat du Mato Grosso (SEMA) réalise également un suivi de la déforestation. Celui-ci est basé sur des images Landsat et CBERS mais le processus n'est pas automatisé. Les parcelles défrichées sont repérées visuellement et cartographiées par plus de 40 techniciens. Il existe donc une certaine hétérogénéité des données due à la subjectivité de la méthode. Par contre, le Mato Grosso dans son intégralité est pris en compte, indépendamment du biome considéré.

Pour cette étude, les données disponibles sont donc (tableau 3.1) :

1. les estimations statistiques de déforestation annuelles de l'INPE de 1992 à 2006 pour le biome forêt au Mato Grosso;
2. les cartes annuelles de déforestation du projet PRODES (PRODES digital) de 2000 à 2006 pour le biome forêt ;
3. les cartes mensuelles de déforestation de l'IMAZON de août 2006 à mars 2008 pour le biome forêt ;
4. les cartes annuelles de déforestation de la SEMA de 1992 à 2005 pour les biomes forêt et *cerrado* (il manque toutefois les données des années 1996, 1998 et 2000 et seule la partie nord de l'Etat a été cartographiée en 1994).

Etant donné la diversité et la complémentarité des données disponibles, une phase de validation s'impose. Celle-ci est réalisée en comparant les données entre elles pour évaluer leur cohérence et juger de la possibilité de les utiliser conjointement. Malheureusement, les cartes de déforestation de l'IMAZON ne peuvent pas être validées car il n'existe pas de données disponibles du PRODES pour les années 2006 et 2007. Cependant, Souza Jr *et al.* (2008) affirment que les données SAD détectent 95% des parcelles déboisées détectées à partir d'images Landsat et CBERS (les 5% non détectés n'ayant pu être comparés car les parcelles étaient couvertes par les nuages).

¹ Townshend *et al.* (2000) critiquent cette méthode car les valeurs attribuées à un pixel incluent des informations issues des pixels alentours. Il est donc compliqué d'estimer la proportion d'un type d'occupation du sol au sein d'un pixel.

	SEMA	PRODES	IMAZON
1992	X		
1993	X		
1994	X		
1995	X		
1996			
1997	X		
1998			
1999	X		
2000		X	
2001	X	X	
2002	X	X	
2003	X	X	
2004	X	X	
2005	X	X	
2006		X	X
2007			X

Tableau 3.1 : Bilan des données de déforestation utilisées dans cette étude.

Il s'agit donc surtout de comparer les données de la SEMA et de l'INPE (cartes PRODES et statistiques annuelles). Ces comparaisons sont effectuées pour les régions (biome forêt) et la période (1993-2005) qui ont été traitées par les deux sources de données. Tout d'abord, une simple comparaison des chiffres indique que les superficies défrichées entre 1993 et 2005 mesurées par l'INPE et par la SEMA sont proches. Les données de l'INPE ont détecté 99 402 km² défrichés sur cette période d'étude tandis que la SEMA détectait 97 504 km². Cependant, les comparaisons annuelles sont moins cohérentes. La figure 3.3 indique qu'il existe de fortes différences pour certaines années (outre les années 1996, 1998 et 2000 qui n'ont pas été analysées par la SEMA). Les chiffres calculés par la SEMA pour les années 1997 et 1999 sont bien plus élevés que ceux de l'INPE et semblent donc inclure les années 1996 et 1998. Par contre, les données de la SEMA pour l'année 2001 sont légèrement supérieures à celles de l'INPE, ce qui laisse à croire que l'année 2000 n'a jamais été prise en compte par la SEMA. De plus, les estimations de la SEMA pour l'année 2002 sont sous-estimées tandis que le déboisement de l'année 1994 n'a été cartographié que pour une partie du Mato Grosso (au nord). Pour les autres années qui ont été normalement calculées par les deux institutions (1993, 1995, 2001, 2003, 2004, 2005), les estimations de la SEMA sont supérieures à celles de l'INPE.

Les cinq années cartographiées par le projet PRODES et par la SEMA permettent de valider la précision spatiale de ces données (tableau 3.2 et figure 3.4). Les indices de Kappa obtenus à partir des cartes de déforestation annuelles sont relativement bas (entre 0,36 et 0,58). Ceci indique de fortes différences entre les cartes qui sont confirmées par les différences absolues et relatives observées. Ainsi, les données SEMA surestiment les déboisements de 25% en moyenne par rapport aux données PRODES (les déboisements de l'année 2002 sont cependant largement sous-estimés par la SEMA, ce qui prouve qu'il existe bien des lacunes cette année-là). Sur la période d'étude totale 2001-2005, l'indice de Kappa augmente ($K = 0,64$). Un certain nombre de déboisements détectés par l'INPE (*SEMA*) pour une année donnée ont en fait été détectés par la SEMA (*INPE*) une autre année entre 2001 et 2005. Une partie des différences pourrait donc s'expliquer par des calendriers différents.

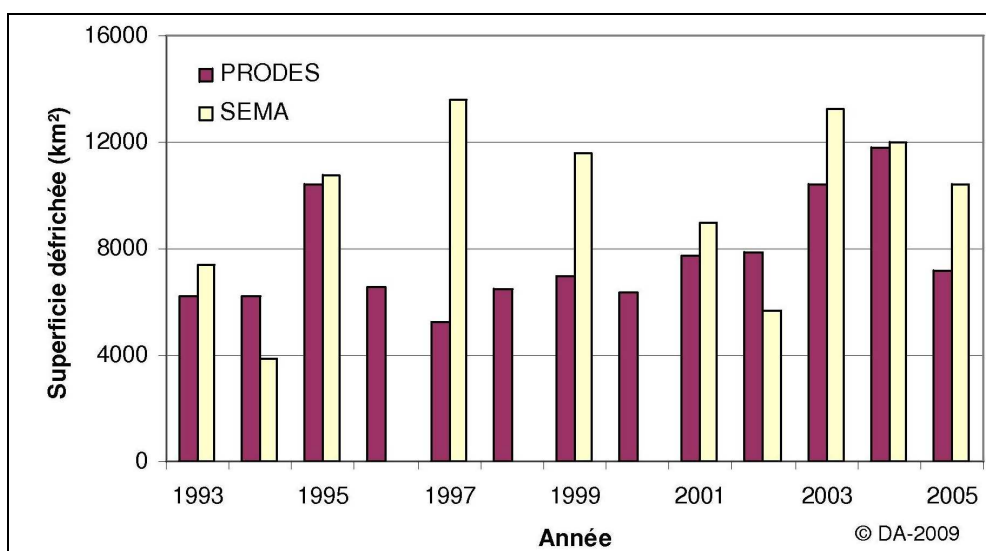


Figure 3.3 : Comparaison des déboisements annuels calculés par le projet PRODES et par la SEMA.

	2001	2002	2003	2004	2005	Total 2001-05
Indice de kappa	0.36	0.42	0.51	0.58	0.42	0.64
Superficie défrichée détectée par PRODES et pas par SEMA (km²)	4 119	6 557	4 442	3 782	4 423	14 131
Superficie défrichée détectée par SEMA et pas par PRODES (km²)	5 941	2 330	6 954	5 471	6 387	17 506
Superficie défrichée détectée par SEMA et par PRODES (km²)	3 004	3 313	6 302	6 524	4 059	32 394
Superficie totale de déboisement détectée par PRODES (km²)	7 124	9 870	10 744	10 307	8 482	46 525
Superficie totale de déboisement détectée par SEMA (km²)	8 946	5 643	13 256	11 995	10 447	49 900
Différence relative entre les données SEMA et PRODES (%)	+25,6	-42,8	+23,38	+16,38	+23,16	+7,25

Tableau 3.2 : Comparaison des données de déforestation obtenues para la SEMA et par le PRODES entre 2001 et 2005.

Pour affiner la comparaison et confirmer cette hypothèse, une zone test est prise en exemple. Les communes de Sinop, Santa Carmem, Vera, Claudia et União do Sul sont choisies car (i) elles sont entièrement considérées par les cartes du projet PRODES et de la SEMA et (ii) ce sont des communes où l'avancée du soja a été forte pendant la période d'étude. La déforestation détectée au cours de l'année 2004 est prise en exemple car les données de déforestation des années précédente et suivante sont disponibles afin de valider l'hypothèse selon laquelle des parcelles déboisées peuvent être détectées à des années différentes selon les données considérées.

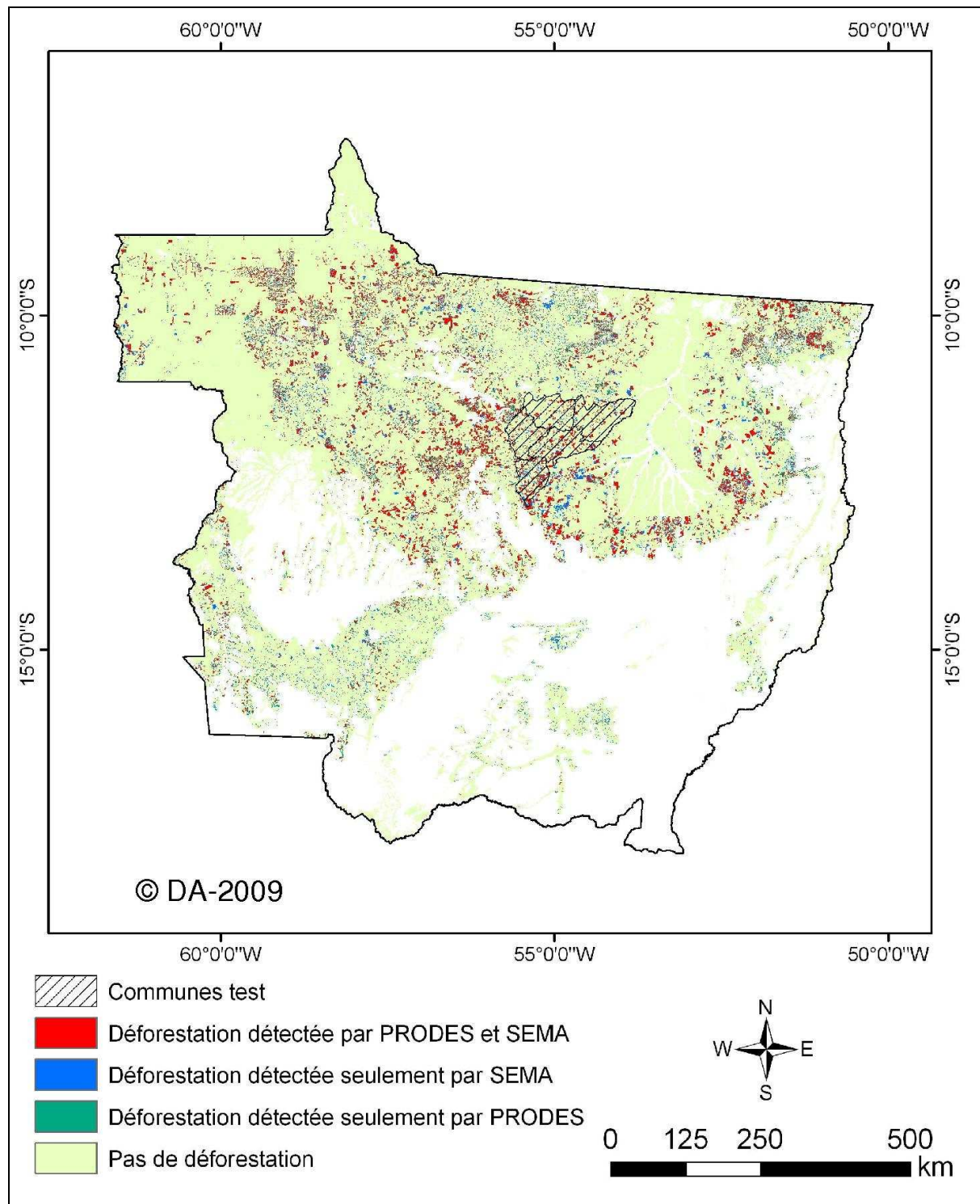


Figure 3.4 : Comparaison de la déforestation détectée par le projet PRODES et par la SEMA pour le biome forêt entre 2001 et 2005.

Pour une superficie totale de 1 851 408 ha entre les cinq communes, les données PRODES détectent 81 704 ha de terrain défrichés contre 71 085 ha pour les données SEMA. Il existe donc à priori une sous évaluation des données SEMA dans la région contrairement à ce qui a été déterminé pour l'ensemble de la région forestière. L'indice de Kappa entre les deux sources de données est de 0,62 et confirme le fait qu'il existe des différences entre les cartes PRODES et SEMA.

En fait, une analyse plus approfondie fait remarquer que les différences entre les deux données sont surtout expliquées par les défrichements de petites tailles. Les grandes parcelles déboisées sont majoritairement détectées par les deux données (fig. 3.5). Les quelques cas de grandes parcelles repérées par le projet PRODES et non par les données de la SEMA sont en fait également détectées par la SEMA mais sur les cartes de déforestation de l'année antérieure ou postérieure. Ainsi, des parcelles marquées par le projet PRODES comme étant défrichées en 2004 sont en fait détectées sur les données de la SEMA de 2003 ou 2005 (fig. 3.5). Dans un cas, à l'ouest de la zone d'étude, une parcelle a même été marquée comme déboisée en 1999 par la SEMA tandis que les données PRODES l'indiquent en 2004. Or, cette parcelle déboisée existait déjà sur une image Landsat de 2001 donc, dans ce cas précis, la SEMA a été plus fiable. Finalement, ces différences de détection valident l'hypothèse selon laquelle des calendriers différents pourraient expliquer les divergences existantes.

Selon cette hypothèse, les différences de détection au pas de temps annuel sont fortement atténuées en considérant une plus longue période. Mais il reste toujours des dissemblances puisque la SEMA surestime les défrichements par rapport au PRODES sur le total des cinq années comprises entre 2001 et 2005. Il existe en effet un certain nombre de parcelles détectées par la SEMA et non par le PRODES qu'il convient d'analyser. Certaines de ces parcelles sont repérées et leur état est vérifié à partir des données CBERS de l'année 2006 (année suivant la dernière année de la période d'étude). La commune de Vera déjà présentée auparavant est prise en exemple car il y existe un grand nombre de parcelles dans ce cas de figure (fig. 3.6). Certaines parcelles repérées par la SEMA comme défrichées pendant la période d'étude sont en fait détectées sur les données de l'année 2000 du PRODES (confirmant ainsi l'hypothèse déjà exposée auparavant). Cependant, la SEMA détecte également des parcelles défrichées (surtout en 2005) qui apparaissent comme boisées sur les images CBERS et Landsat des années suivantes. En fait, la végétation de ces parcelles apparaît dégradée (teinte plus foncée) par rapport à la végétation native voisine. Ces dégradations peuvent s'expliquer par (i) la mise en place d'une première forme d'exploitation de ces parcelles avant le déboisement total ou (ii) un déboisement commencé mais non achevé pour une raison inconnue (probablement économique). Cette dernière hypothèse a pu être vérifiée lors d'une mission de terrain réalisée en 2008 au cours de laquelle il est apparu que la végétation de certaines parcelles détectées comme défrichées par la SEMA et non par l'INPE se trouvaient dans un état de régénération. Il y aurait donc bien eu une forme de changement d'utilisation du sol dans ces parcelles, mais celui-ci est tellement léger qu'il est impossible à détecter à partir de méthodes automatisées. Dans ce cas, la SEMA est plus précise que l'INPE, ce qui explique en partie les différences observées. Cette meilleure précision est rendue possible par (i) les méthodes de détection manuelles employées à la SEMA et (ii) par le fait que les demandes d'autorisation de déboisement sont fournies par la SEMA, ce qui permet aux cartographes de faire un suivi particulier sur ces espaces et de les inclure dans les statistiques avant que le processus de déforestation ne soit complètement achevé.

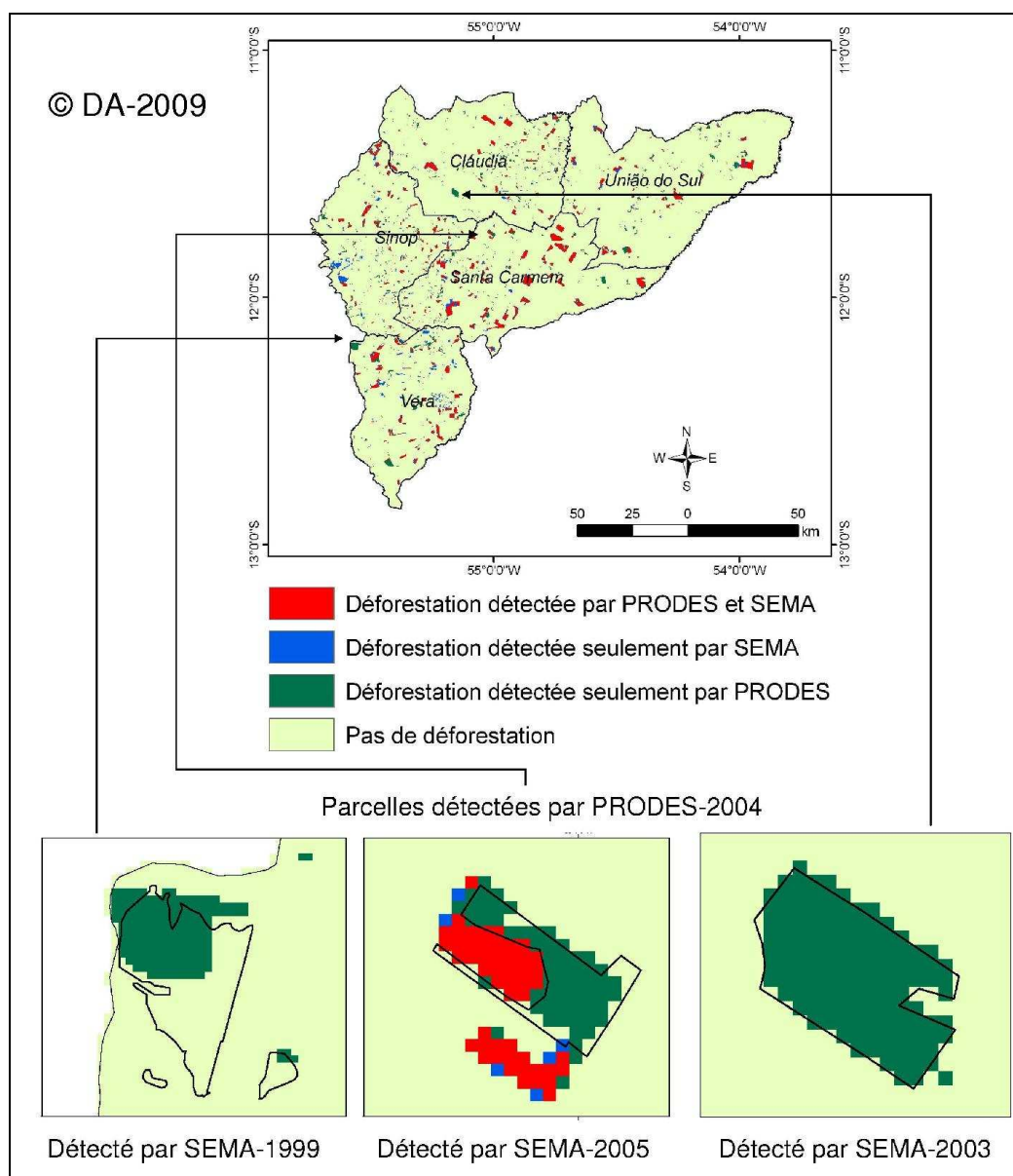


Figure 3.5 : Comparaison des données de déforestation fournies par la SEMA et issues du projet PRODES pour l'année 2004 sur cinq communes *matogrossenses*.

En conclusion, il existe bien des différences entre les données de déforestation produites par la SEMA et l'INPE. Ces différences s'expliquent notamment par :

1. des différences dans les détections des petites parcelles ;
2. des différences dans les calendriers utilisés pour réaliser les cartes ;
3. des différences dans les images utilisées ;
4. l'emploi d'une méthode de détection automatisée par l'INPE qui ne permet de détecter que les coupes à blanc et non les forêts dégradées.

Ainsi, tous les polygones marqués par le projet PRODES ou par la SEMA correspondent à des formes de changements d'occupation et d'utilisation du sol. Ces données peuvent donc être utilisées conjointement afin de recréer des cartes de déforestation annuelles pour la période 1993-2007. Lorsqu'un pixel est repéré comme déboisé à des dates différentes selon les données considérées, on considère valable la source ayant repéré le défrichement en premier. De cette manière, la précision des cartes de déforestation annuelle est améliorée à partir des données présentées dans le tableau 3.1.

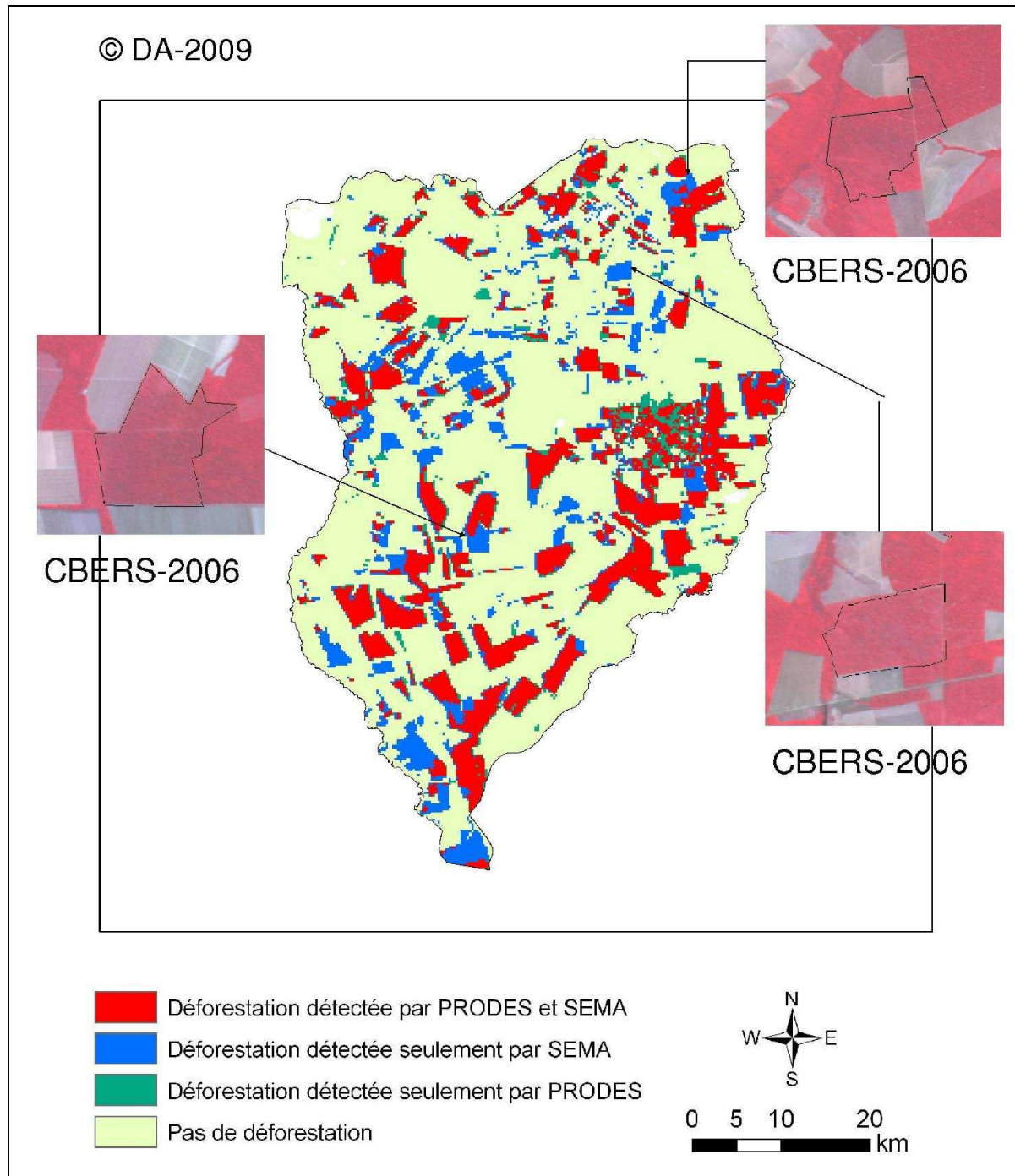


Figure 3.6 : Comparaison des données de déforestation fournies par la SEMA et issues du projet PRODES pour la commune de Vera sur la période 2001-2005. Les images en médaillon présentent des parcelles défrichées en 2005 selon la SEMA et leur statut en 2006 observé par CBERS.

3. Présentation de la méthode utilisée pour analyser la dynamique du front pionnier au Mato Grosso

Les trois données disponibles (cartes agricoles, cartes de déforestation et cartes de végétation) sont utilisées pour obtenir des informations sur les changements d'occupation et d'utilisation du sol au Mato Grosso. Ces changements représentent l'évolution de la

déforestation, de l'expansion agricole et de l'intensification agricole, ce qui revient à étudier les trois stades de l'avancée du front pionnier présentés en Partie 1 – chapitre 2 : front d'ouverture, front économique et front d'intensification.

Il s'agit donc d'analyser l'évolution spatio-temporelle de chaque front et d'évaluer le rôle joué par la culture du soja dans les changements d'occupation du sol au Mato Grosso. Ce travail doit alors déboucher sur une proposition de typologie des territoires du soja au Mato Grosso.

Pour ce faire, il convient d'appliquer une méthode basée sur :

- une échelle spatiale à laquelle les changements d'occupation et d'utilisation du sol sont analysés ;
- des variables permettant de qualifier et quantifier les changements ;
- un mode de représentation explicite.

3.1. Une étude multiscalaire

Selon Albaladejo *et al.* (1996), il existe trois niveaux d'étude des espaces ruraux : l'exploitation agricole, la localité agraire et la grande région ou le pays. L'enjeu est de déterminer si « les changements affectant les relations société/territoire relèvent de l'un de ces niveaux, lequel et pour quelle raison ? Ou bien ils relèvent des trois à la fois et dans ce dernier cas, comment peut-on articuler l'ensemble en une problématique cohérente ? » (Albaladejo *et al.*, 1996).

A l'échelle locale, la qualité des données MODIS dépend surtout de la taille des parcelles et des exploitations observées, lesquelles peuvent varier entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers d'hectares au Mato Grosso. La résolution spatiale des données MODIS est surtout efficace pour les études aux échelles inférieures. Les données utilisées servent donc à l'analyse des changements d'occupation du sol au niveau régional et au niveau de la localité agraire.

Au niveau régional, il s'agit de comprendre les changements à l'échelle du Mato Grosso et déterminer si il existe des différences de dynamiques des changements d'occupation du sol entre les biomes *cerrado* et forêt.

L'échelle de la localité agraire est plus compliquée à définir. Toujours selon Albaladejo *et al.* (1996), les agriculteurs n'agissent pas comme des individus isolés : « ils font partie de groupes d'exploitants voisins qui, en discutant journalièrement à propos de leurs pratiques, produisent inconsciemment un certain nombre de normes techniques locales orientant leurs perceptions et leurs capacités de changement ». En effet, les producteurs se côtoient régulièrement dans le cadre d'organismes locaux (Syndicats, Centre de Tradition Gaucha, CAT à Sorriso), dans le cadre de leurs négociations avec les entreprises acheteuses de soja (les producteurs se rendent régulièrement dans les bureaux des sociétés et des techniciens viennent les visiter) ou lors des réunions d'informations organisées par les instituts de recherche présents localement (il existe au moins six centres de recherche entre Lucas do Rio Verde et Sinop¹). De cette manière, la localité agraire n'inclut pas simplement des producteurs et leurs exploitations agricoles mais toute une filière agricole composée de

¹ La Fundação Rio Verde à Lucas do Rio Verde, Monsanto, Fundação-MT, BASF à Sorriso, Agronorte et Empaer à Sinop.

producteurs, de techniciens, de chercheurs, qui « font partie de groupes professionnels dont la composition, la morphologie et le fonctionnement interviennent sur les capacités de production de changements » (Albaladejo *et al.*, 1996).

L'échelle administrative la plus intuitive pour prendre en compte ces paramètres est la commune car le réseau associatif, institutionnel et privé est largement basé sur l'échelle municipale. Cependant, les superficies des communes limitent l'intérêt de cette échelle. Celles-ci sont souvent très grandes et différentes phases d'occupation du territoire peuvent alors s'y retrouver. La commune de Nova Ubiratã illustre bien ce problème. En effet, elle s'étend sur plus de 200 km d'est en ouest. La partie ouest, proche de Sorriso, est complètement destinée à la production agricole tandis que, la partie est, située dans le parc du Xingu, est protégée. Le front pionnier s'étale donc entre ces deux extrémités et une étude à l'échelle municipale ne permet pas de le caractériser précisément.

L'échelle municipale n'étant pas satisfaisante, il faut déterminer une échelle spatiale intermédiaire qui soit à la fois assez large pour représenter un groupe d'exploitations agricoles ou une localité agraire, et assez fine pour observer les différents stades d'évolution des fronts sur un petit territoire. Selon la SEMA, il existe 1175 localités au Mato Grosso, dont la superficie est de 906000 km². Ainsi, chaque localité représente en moyenne une superficie de 771 km². Nous avons donc choisi de diviser le Mato Grosso en une grille de cellules de 0,25° x 0,25° (environ 28 km x 28km), soit 770 km². Dans une commune comme Sapezal où les fazendas sont reconnues pour être très grandes (3466 ha en moyenne en 2006 selon l'IBGE), cette superficie représente 22 fazendas par cellule ce qui est cohérent avec la notion de localité agraire. Par ailleurs, cette taille de cellule a également été choisie car elle correspond à la résolution spatiale des données de précipitations issues des produits TRMM qui sont présentées dans la Partie 4 de cette thèse.

3.2. Définition des variables caractérisant la dynamique du front pionnier

3.2.1. Les variables pour cartographier les fronts composant le front pionnier

Après avoir déterminé l'échelle d'étude, il est nécessaire de déterminer les variables à calculer pour illustrer la dynamique du front pionnier au Mato Grosso. Comme il a déjà été vu, ce front s'organise autour de trois frontières qui se succèdent dans le temps et dans l'espace :

- le front d'ouverture ;
- le front économique, défini par ici par l'agriculture mécanisée ;
- le front d'intensification.

Le front d'ouverture correspond au stade d'occupation du territoire et est caractérisé par le taux de déforestation. La variable calculée ici est donc : le **taux de déforestation par unité spatiale** (une unité spatiale étant une cellule de 0,25° x 0,25°).

Le front économique correspond à la progression de la frontière agricole, en arrière du front d'ouverture. Son avancée est mesurée par le **taux de mise en culture par rapport aux surfaces déboisées par unité spatiale**.

Il existe différentes manières d'intensifier la production agricole (Partie 1-chap.3) et donc de repérer le front d'intensification. Les variables retenues dans cette thèse sont : le **nombre de cultures semées** (systèmes de production en simple ou double cultures

commerciales) et **la couverture des sols tout au long de l'année**¹. Par contre, la variable représentant les modes de semis appliqués par les producteurs (semis direct ou conventionnel) n'est pas conservée car la classification ne s'est pas montrée assez efficace pour la discriminer.

Le **niveau de diversification agricole** est un autre indicateur permettant de mesurer un changement dans les pratiques culturales. Il existe de nombreuses activités de diversification pour les producteurs mato-grossense (élevage bovin, élevage de volailles, pisciculture, suinoculture, canne à sucre, tourisme) mais toutes ne peuvent pas être détectées par télédétection. Nous résumons ici la diversification aux trois cultures commerciales analysées dans cette thèse : soja, coton et maïs. Le peu de cultures prises en compte est une limite de cette étude mais cela permet tout de même d'apprécier la tendance des changements qui s'opèrent dans les modes de production. La diversification peut être mesurée à partir d'indices permettant de résumer l'information contenue dans les classifications d'images MODIS. L'indice choisi est l'inverse de l'indice de Herfindhal couramment utilisé en économie pour mesurer la concentration d'un secteur (Tauer et Seleka, 1994). Le nouvel indice de diversification (ID) est défini par la formule (Tauer et Seleka, 1994):

$$ID = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i^2}$$

Où P_i est la part de la i -ème culture dans le total des surfaces semées.

La valeur maximale de ID est le nombre de cultures considérées. Ainsi, si $ID = 3$, les trois cultures ont la même participation dans la superficie totale semée, la diversification est donc considérée comme maximale. Si $ID = 1$, une seule culture est cultivée et la diversification est considérée comme minimale.

La progression du front d'intensification agricole en arrière du front économique est donc mesurée par :

- le *taux de double cultures commerciales par rapport aux surfaces cultivées par unité spatiale* ;
- le *taux de couverture permanente des sols par rapport aux surfaces cultivées par unité spatiale* ;
- *l'indice de diversification par unité spatiale*.

La figure 3.7 résume la méthode de calcul des variables utilisées pour détecter les fronts.

¹ Le mode de calcul de ces variables est présenté en Partie 2 – Chap. 3.

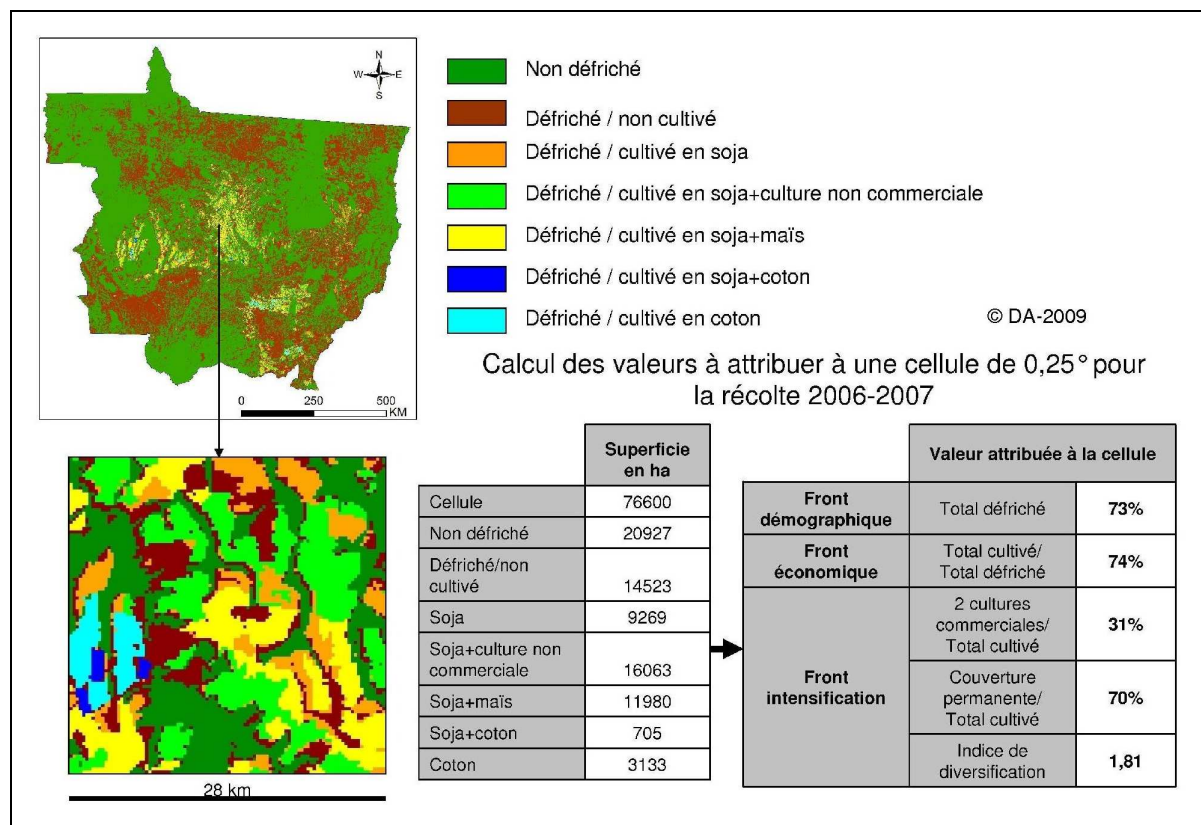


Figure 3.7 : Présentation de la méthodologie appliquée à une cellule de 0,25° pour la récolte 2006-2007 afin de détecter les fronts démographiques, économiques et d'intensification.

3.2.2. Les variables pour cartographier les interactions entre fronts

Nous avons vu au cours de la première partie de cette thèse que les fronts se succèdent au sein du front pionnier selon des logiques économiques, sociales et démographiques différentes. Cependant, ils ne sont en aucun cas indépendants. Par exemple, les petits colons venant s'installer en avant du front pionnier pour pratiquer une agriculture traditionnelle sont souvent forcés de migrer suite au développement de l'agriculture capitaliste dans leur région d'origine. De même, l'intensification agricole peut engendrer des profits qui incitent les producteurs à accroître leurs superficies cultivées, ce qui amène Angelsen et Kaimowitz (2001a) à émettre l'hypothèse de l'existence d'un lien entre intensification agricole et déforestation.

La dynamique du front pionnier ne peut donc pas s'étudier sans évaluer les interdépendances existantes entre les frontières qui le composent. Pour répondre à cette problématique, nous cherchons à déterminer des variables permettant d'expliquer en quelle mesure :

- l'expansion agricole est un facteur de déforestation ;
- l'intensification agricole est un vecteur d'expansion agricole ;
- l'avancée de la frontière agricole, i.e. l'augmentation de la production agricole, est le résultat de l'expansion agricole ou de l'intensification agricole ;
- l'intensification agricole est un frein ou un accélérateur de la déforestation.

3.2.2.1. Impact de l'expansion agricole sur la déforestation

Les graphes présentés au chapitre 4 de la Partie 1 (fig 1.27) indiquent une corrélation ($R^2 = 0,69$) entre la déforestation annuelle et les surfaces nouvellement mises en culture. De nombreuses recherches pointent donc du doigt l'expansion de la culture du soja en la présentant comme un vecteur de déforestation (Fearnside, 2001 ; Cardille et Foley, 2003 ; Morton *et al.*, 2006). De leur côté, les producteurs et le secteur agricole dans son ensemble se défendent en se basant sur un discours repris à l'unisson et qui s'appuie sur deux arguments principaux :

1. l'agriculture mécanisée est moins prédatrice que l'élevage : celui-ci serait le grand prédateur de l'Amazonie puisque la majeure partie des déboisements localisés au nord de l'Etat sont convertis en pâturages. Par ailleurs, les déboisements effectués par les éleveurs sont moins respectueux des lois puisque les Aires de Protection Permanentes (APP) sont bien souvent défrichées pour laisser un accès à l'eau pour le bétail.
2. l'expansion agricole au Mato Grosso se fait aujourd'hui sur des terres anciennement déboisées et abandonnées ou vendues par la suite (voir le cycle de vie d'une exploitation agricole en Partie 1-Chapitre 2). Il faudrait donc « se réjouir » que les *fazendeiros* rendent ces terres productives.

Ces deux arguments posent la question de l'existence (ou non) d'un lien direct entre déforestation et expansion agricole. Or, d'après les missions de terrain, il est évident que certaines parcelles sont défrichées pour être cultivées en soja. Le problème n'est donc pas d'estimer si ce lien existe mais de le quantifier et de le localiser. Pour cela, il est nécessaire de définir dans quel cas une parcelle est défrichée pour être cultivée en soja (ou toute autre culture mécanisée). Généralement, une parcelle défrichée par un agriculteur est cultivée en soja entre un et deux ans après le déboisement. Entre temps, le producteur sème du riz pour corriger les sols. Ainsi, nous considérons dans cette thèse que tout pixel détecté comme étant cultivé dans les deux années suivant le déboisement témoigne d'un lien direct entre déforestation et expansion agricole.

A partir de cette hypothèse, deux variables sont calculées pour vérifier les deux arguments présentés ci-dessus :

1. ***le pourcentage de surfaces déboisées par unité spatiale entre 2000 et 2006 ayant été détectées en culture dans les deux années suivant le déboisement ;***
2. ***le pourcentage de l'expansion agricole, par unité spatiale, entre les récoltes 2000-2001 et 2006-2007 ayant été effectuée sur des parcelles déboisées plus de deux ans au auparavant.***

Ces deux variables permettent de quantifier l'existence d'un lien direct entre expansion agricole et déforestation. Cependant, elles ne fournissent pas d'indication sur l'existence d'un lien indirect. En effet, à supposer que 100% de l'expansion agricole soit effectuée sur des parcelles anciennement défrichées pour d'autres fins que l'agriculture, cela n'indique pas si le rachat, par les producteurs capitalisés, de terres anciennement déboisées pousse les anciens propriétaires à migrer plus en avant sur le front pionnier ou à rejoindre les villes par exemple. Le meilleur moyen pour répondre à cette problématique est d'effectuer des enquêtes de terrain auprès des habitants pour déterminer des tendances migratoires. Cependant, cela n'a pas été réalisé dans cette thèse qui est axée sur l'application de techniques de télédétection.

Retranscrire cette problématique en télédétection revient à évaluer l'existence d'un lien entre l'expansion agricole sur un territoire donné (une localité agraire par exemple) et la déforestation à des fins non agricoles sur un autre territoire. Un tel lien est difficile à définir à partir d'images satellitaires car cela implique de savoir vers quelles régions migrent ces personnes tout en étant conscient qu'il peut exister une forte variabilité régionale des tendances migratoires (par exemple, une personne quittant la région de Sorriso ne migre pas forcément vers les mêmes endroits qu'une personne quittant la région de la Chapada dos Parecis). La télédétection se montre donc limitée pour résoudre ce problème et son utilisation ici ne peut se réduire qu'à un rôle d'indicateur. Ainsi, l'étude de cette relation à partir des données satellitaires se fait de deux manières :

- *en comparant les cartes du front économique et du front d'ouverture ;*
- *en mesurant une relation entre le niveau d'expansion agricole dans une unité spatiale et la déforestation à des fins non agricole aux alentours de cette unité spatiale.*

3.2.2.2. L'expansion agricole et l'intensification agricole au Mato Grosso

L'expansion agricole est supposée jouer un rôle moteur dans la déforestation, que ce soit de manière directe ou indirecte. Or l'expansion agricole est corrélée avec les profits apportés par la culture du soja ($R^2 = 0,77$, cf Partie 1 – Chapitre 4). Les profits étant eux-mêmes améliorés par l'intensification agricole, on peut alors émettre l'hypothèse d'un lien entre l'expansion et l'intensification agricole. Parmi les trois variables définissant l'intensification agricole, la variable correspondant à l'adoption des systèmes de production en double cultures commerciales est celle qui représente le mieux la dynamique d'intensification agricole car (i) elle est à la base du mouvement de diversification, (ii) elle permet une couverture permanente des sols et (iii) elle permet d'augmenter les profits rapidement. Pour ces raisons, nous ne considérons que cette variable pour évaluer le lien entre intensification agricole et expansion agricole.

Le lien entre expansion et intensification est indirect car il s'agit de déterminer si l'intensification agricole dans une unité spatiale est un facteur explicatif de l'expansion agricole dans les localités avoisinantes. On suppose en effet que, d'après le graphe de DeFries *et al.* (2004) (cf Partie 1 – Chapitre 2), l'intensification agricole se développe dans les localités agricoles déjà consolidées et où l'expansion est par conséquent limitée. Ainsi, comme pour l'étude d'un lien indirect entre expansion agricole et déforestation, l'utilisation de la télédétection se limite à un rôle d'indicateur en :

- *comparant les cartes du front d'intensification et du front économique ;*
- *en mesurant une relation entre le niveau d'intensification agricole dans une unité spatiale et l'expansion agricole aux alentours de cette unité spatiale ;*

Par ailleurs, l'expansion et l'intensification agricole ont pour objectif premier d'augmenter la production agricole. Une autre manière de quantifier le lien existant entre le front économique et le front d'intensification consiste donc à mesurer *la part de*

l'augmentation du potentiel de production agricole sur une unité spatiale qui est due à l'intensification ou à l'expansion agricole¹.

Pour cela, nous considérons à la fois l'expansion des surfaces agricoles, qui définissent l'avancée du front économique, et l'expansion des surfaces cultivées en double cultures commerciales, qui représentent l'effort d'intensification agricole visant à augmenter directement la production agricole. Nous différencions alors les surfaces cultivées et les surfaces semées. Les surfaces cultivées représentent les surfaces destinées à la production agricole tandis que les surfaces semées représentent l'effort d'intensification agricole qui est réalisé sur les surfaces cultivées. Les surfaces semées se calculent en multipliant les surfaces cultivées par le nombre de cultures commerciales semées.

Dès lors, un exemple simple permet d'expliquer la méthode de calcul de la part de l'intensification agricole dans l'augmentation de la production. Supposons qu'un producteur cultive 100 hectares en système de production en simple culture lors de la récolte 2000-2001. Au cours de la période 2001-2006, ce producteur a cherché à augmenter sa production. Pour cela, il a acquis une autre parcelle de 100 hectares et il a changé ses pratiques culturales en adoptant un système de production en double cultures commerciales. Ce producteur cultive donc 200 hectares et sème 400 hectares en 2006-2007. Entre les récoltes 2000-2001 et 2006-2007, il a ainsi multiplié son potentiel de production par quatre, la surface semée passant de 100 à 400 hectares. L'augmentation de la surface semée (300 hectares) s'explique par une expansion de la surface cultivée (100 hectares) et par l'intensification agricole (200 hectares). Dans ce cas précis, l'intensification agricole explique donc 66% de l'augmentation de la production agricole. Cette méthode de calcul est illustrée en figure 3.8 par un exemple concret appliqué à une cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

¹ Brown *et al.* (2007) différencie ces deux moyens d'augmenter la production agricole comme l'intensification horizontale (expansion agricole) et l'intensification verticale (intensification agricole).

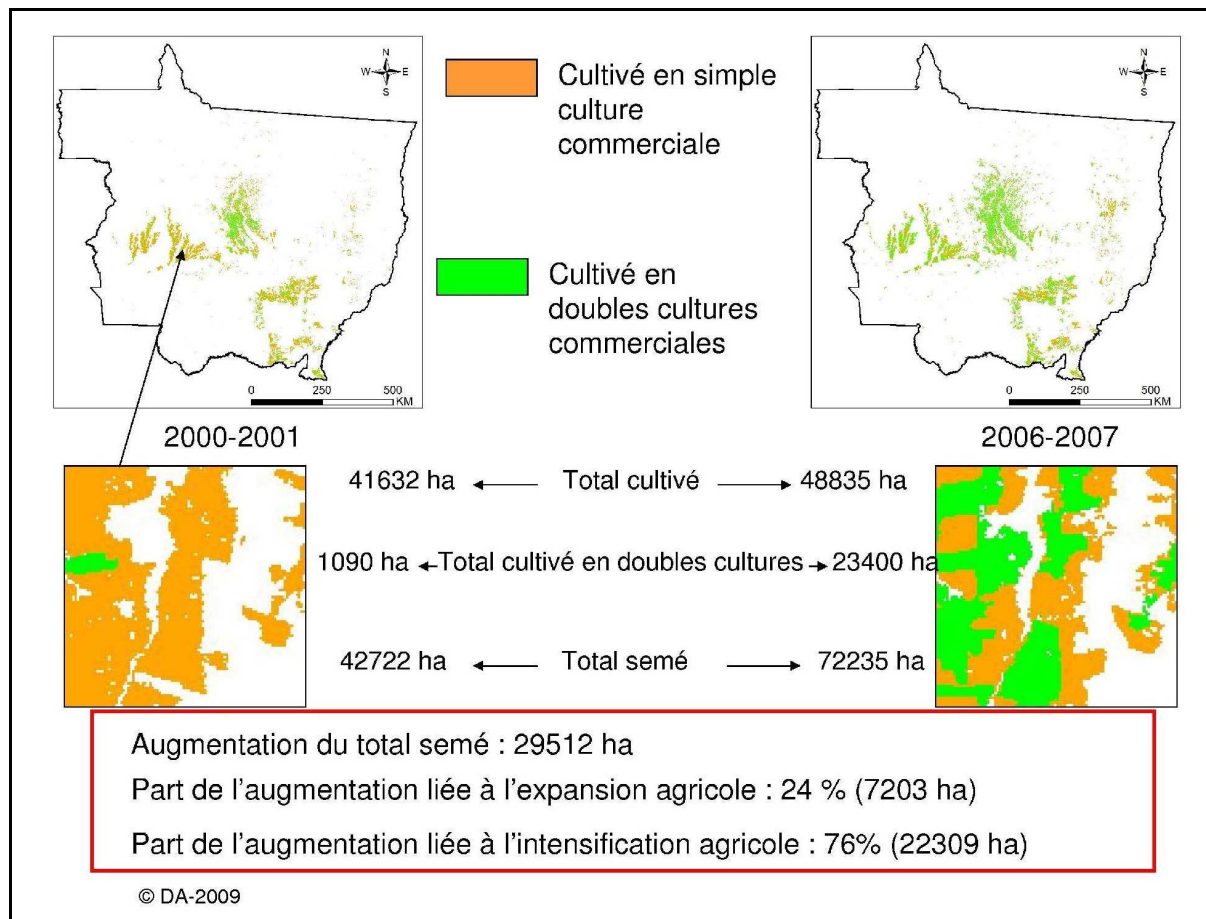


Figure 3.8 : Schéma de présentation de la méthodologie appliquée pour quantifier le lien entre le front économique et le front d'intensification.

3.2.2.3. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation

Pour Borlaug (2000a), l'intensification agricole qui s'est développée dans le cadre de la révolution verte a permis de freiner la déforestation en limitant les surfaces agricoles nécessaires pour atteindre les niveaux de production actuels. Cependant, alors que cette hypothèse se vérifie à l'échelle globale et notamment dans les pays développés, nous avons vu en Partie 1- Chapitre 3 qu'elle est soumise à des variations régionales. Ainsi, Angelsen et Kaimowitz (2001a) affirment qu'il existe un lien entre l'adoption des techniques agricoles et l'augmentation de la déforestation dans les régions tropicales. Un tel lien se vérifie au Mato Grosso où il a été montré en Partie 1 – Chapitre 4 que la déforestation et les profits du soja sont fortement corrélés ($R^2 = 0,94$). Or, l'intensification agricole a pour but d'augmenter les profits ce qui nous amène donc à émettre l'hypothèse d'un lien entre intensification et déforestation. Etant donné que l'adoption d'un système de production en double cultures commerciales est le mode d'intensification le plus à même d'améliorer les profits, c'est cette variable qui est de nouveau considérée en priorité.

Le lien intensification-déforestation est un lien indirect, à l'instar des liens entre expansion agricole et déforestation ou entre intensification et expansion agricole. Une parcelle défrichée à des fins agricoles n'est en effet pas cultivée de manière intensive dès les premières récoltes. L'adoption de pratiques culturales intensives demande un certain temps (deux ans pour semer du soja en simple culture et encore un ou deux ans avant de passer en double cultures). Il est donc difficile de ressortir une tendance sur une période d'étude de sept ans

seulement. Puisque l'intensification agricole se produit sur des parcelles anciennement défrichées, elle se situe dans les régions d'occupation plus ancienne. L'enjeu est donc de déterminer si l'intensification dans ces centres agricoles « historiques » incite les producteurs à déboiser sur la frontière agricole.

Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte des localités qui présentent des caractéristiques comparables, notamment concernant les surfaces cultivées. En effet, une localité en phase d'expansion agricole présente des taux d'intensification agricole faibles alors que le taux de déforestation peut être élevé. Dans ce cas, la déforestation est liée au fort taux d'expansion agricole plutôt qu'au faible niveau d'intensification agricole. Ainsi, seules les localités où plus de 50% du territoire est cultivé en 2006-2007 sont prises en compte pour atténuer le rôle du lien entre expansion agricole et déforestation. Dès lors, une étude visant à relier le degré d'intensification dans ces localités avec la déforestation est menée en :

- *comparant les cartes du front d'intensification et du front d'ouverture ;*
- *mesurant une relation entre le niveau d'intensification agricole (système de production en double cultures) dans une unité spatiale et la déforestation aux alentours de cette unité spatiale.*

Enfin, l'étude des relations entre les différentes frontières qui composent le front pionnier s'appuie sur un lot de variables qui sont listées dans le tableau 3.3. Celles-ci ont pour but de spatialiser la dynamique du soja au Mato Grosso et d'évaluer son impact sur les conversions d'occupation du sol dans cet Etat.

3.2.3. La cartographie des stades d'évolution du front pionnier au Mato Grosso

Après avoir analysé l'existence de liens entre les fronts, nous cherchons à représenter la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol au Mato Grosso sur une même carte. Le but est de créer une typologie des territoires du soja au Mato Grosso. Il s'agit pour cela de détecter à quelle étape de l'avancée du front pionnier se situe chaque cellule de 0,25° x 0,25°, considérée représentative d'une localité agraire, pour mettre en avant les régions les plus « avancées » et les plus « en retard ». Cela permet de déterminer les zones où l'avancée du soja et l'adoption de nouvelles pratiques culturales plus intensives se généralisent et d'analyser comment cette culture est un facteur important pour expliquer les changements d'occupation et d'utilisation du sol au Mato Grosso.

La méthodologie est inspirée du schéma adapté de DeFries *et al.* (2004) (Partie 1- Chapitre 2) retraçant l'évolution spatio-temporelle du front pionnier. Selon ce schéma, il est possible d'estimer à quelle étape de l'avancée du front pionnier se situe un territoire en fonction de la proportion du paysage représentée par les principaux types d'occupation du sol. Il existe alors cinq étapes d'évolution du front pionnier : pré-colonisation, occupation, consolidation, intensification et stabilité. Toutefois, ce schéma très général n'est pas parfaitement pertinent pour l'étude de l'évolution du front pionnier au Mato Grosso et il convient donc de faire quelques adaptations. En effet, en Amazonie, les changements d'occupation du sol et d'utilisation se produisent à des rythmes accélérés. Par exemple, l'agriculture capitaliste peut remplacer directement la forêt. Dans ce cas, la phase d'occupation par les activités autres que l'agriculture mécanisée peut être tronquée et l'avancée du soja devient le vrai moteur du front pionnier. De même, les premiers signes d'intensification agricole peuvent apparaître bien avant la fin du stade d'occupation ou de

consolidation. Dans d'autres cas, la déforestation peut s'effectuer rapidement, traduisant une forte progression du front d'ouverture, tandis que l'avancée de l'agriculture capitaliste est inexistante pour diverses raisons (climat, sol, relief...). On atteint donc un stade où les surfaces en forêt sont comparables à celles rencontrées dans les phases d'intensification où de stabilité alors que les surfaces agricoles sont faibles.

N° de variable	Objectif	Mode de calcul
1	Front d'ouverture	Taux de déforestation par unité spatiale
2	Front économique	Rapport entre les surfaces cultivées et les surfaces déboisées par unité spatiale
3	Front d'intensification	Rapport entre la surface cultivée en double cultures commerciales et le total des surfaces cultivées par unité spatiale
4	Front d'intensification	Rapport entre la surface couverte en permanence et le total des surfaces cultivées par unité spatiale
5	Front d'intensification	Indice de diversification par unité spatiale
6	Lien direct entre front d'ouverture et front économique	Pourcentage de déboisement détecté en culture dans les deux années suivantes
7	Lien entre direct front d'ouverture et front économique	Pourcentage de l'expansion agricole réalisée sur des parcelles défrichées plus de deux ans auparavant
8	Lien indirect entre front d'ouverture et front économique	Etude d'un lien entre l'expansion agricole sur une unité spatiale et la déforestation aux alentours + analyse cartographique
9	Lien indirect entre front économique et front d'intensification	Etude d'un lien entre l'intensification agricole sur une unité spatiale et l'expansion agricole aux alentours + analyse cartographique
10	Lien indirect entre front économique et front d'intensification	Part de l'augmentation du potentiel de production agricole expliquée par l'intensification ou l'expansion agricole
11	Lien entre front d'intensification et front d'ouverture	Etude d'un lien entre l'intensification agricole sur une unité spatiale et la déforestation aux alentours + analyse cartographique.

Tableau 3.3 : Les variables employées pour détecter les fronts démographiques, économiques et d'intensification et leurs liens.

Pour ces raisons, une adaptation du schéma de DeFries *et al.* (2004) au cas particulier du Mato Grosso et aux données disponibles est proposée. Ces dernières nous permettent de considérer quatre types d'occupation du sol :

- F : forêt
- D : défriché mais non cultivé par l'agriculture capitaliste
- E : agriculture extensive capitaliste
- I : agriculture intensive capitaliste

Par rapport aux classes d'occupation proposées par DeFries *et al.* (2004), les zones urbanisées et les espaces protégés sont donc écartés car nous ne disposons pas d'informations

sur leur évolution au cours de la période d'étude. Les forêts en régénération sont également exclues.

A partir de l'agencement des ces quatre classes d'occupation du sol, nous considérons alors huit classes qui représentent les différents stades d'évolution du front pionnier. Les seuils de proportion du paysage représenté par chaque classe sont inspirés de Clairay (2003) (fig. 3.9).

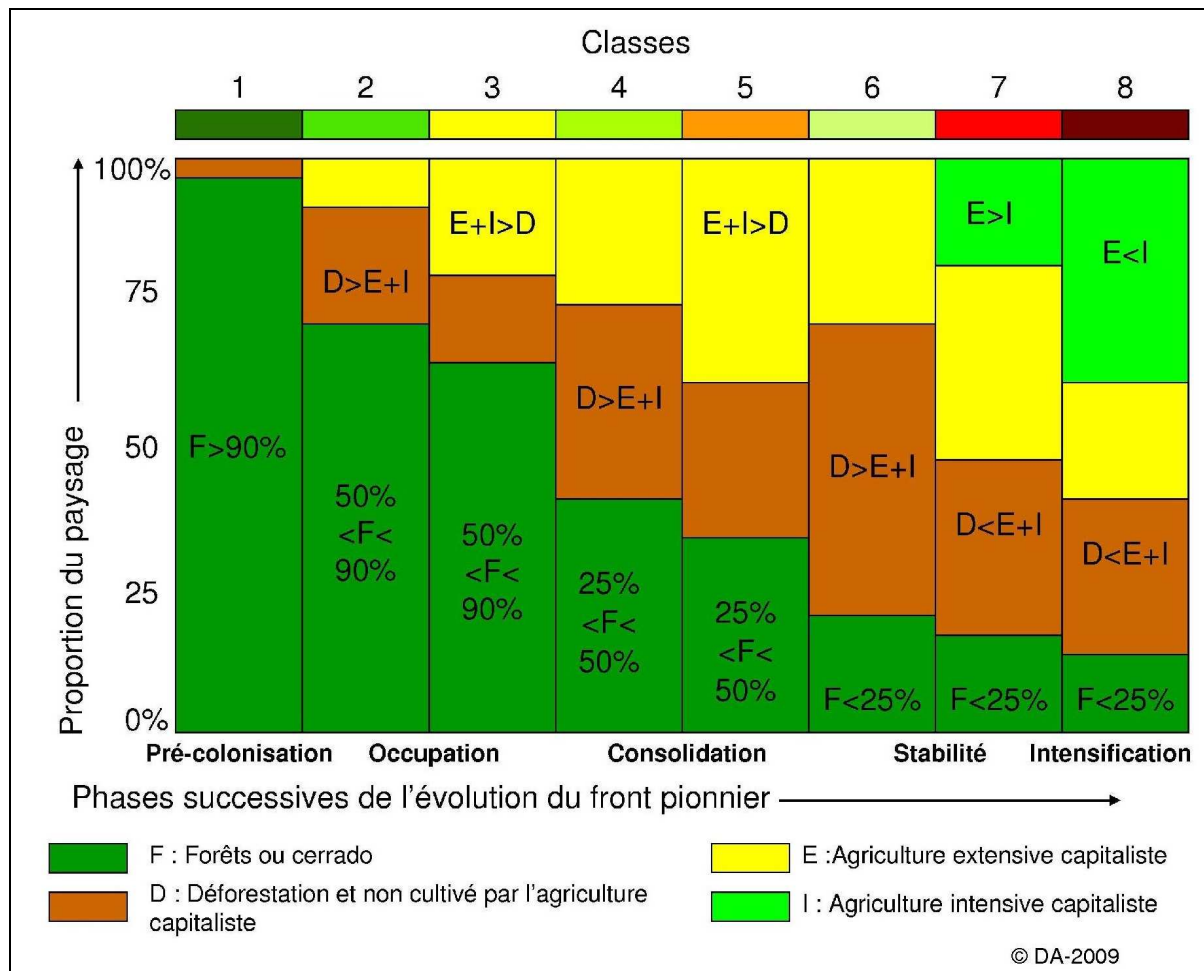


Figure 3.9 : Evolution spatio-temporelle du front pionnier (adapté de DeFries *et al.*, 2004).

Le stade de végétation vierge ou de pré-colonisation (classe 1) est caractérisé par un territoire au sein duquel la forêt occupe plus de 90% de l'espace.

Le stade d'occupation se définit par une phase où la forêt occupe entre 50 et 90% du territoire. La phase d'ouverture est donc en cours mais il convient de préciser si cette ouverture s'explique par l'expansion des surfaces cultivées en soja ou non. On établit donc un deuxième critère de distinction : si les surfaces cultivées sont supérieures aux surfaces non cultivées, le front pionnier se situe en phase d'occupation agricole (classe 2). Sinon, on parle de stade d'occupation non agricole (classe 3). Dans ce dernier cas, précisons que les pâturages, qui ne sont pas détectés par la classification, sont donc ici considérés comme ne faisant pas partie du secteur agricole.

Le stade de consolidation est atteint lorsque la forêt n'occupe plus qu'entre 25 et 50% de l'espace. Ici aussi, il faut alors distinguer le stade de consolidation non-agricole (classe 4),

lorsque les surfaces agricoles sont inférieures aux surfaces non-agricoles, du stade de consolidation agricole (classe 5).

Lorsque la forêt représente moins de 25% de l'espace, on atteint une phase de stabilisation. Celle-ci peut également être non agricole (classe 6), par exemple si l'agriculture traditionnelle ou l'élevage occupent plus de 50% des terres défrichées, ou agricole (classe 7), si l'agriculture capitaliste est majoritaire.

Enfin, le stade d'intensification (classe 8) est atteint lorsque, après le stade de stabilisation agricole, les surfaces cultivées en système de production en double cultures commerciales sont supérieures aux surfaces cultivées avec une seule culture.

3.3. La représentation de l'information

Après avoir déterminé l'échelle spatiale de l'étude et les variables à considérer, il est essentiel de cartographier l'information produite de manière explicite. L'objectif est de représenter la dynamique spatio-temporelle de l'occupation et de l'utilisation du sol. Deux questions se posent : (i) quel mode de représentation est le plus adapté pour représenter la dynamique spatio-temporelle des fronts ? et (ii) comment rendre la carte plus compréhensible ? La résolution spatiale de $0,25^\circ$ entraîne effectivement un effet mosaïqué qui perturbe la lecture de la carte. Il est donc souhaitable de la ré-échantillonner en appliquant une méthode d'interpolation spatiale.

3.3.1. Le mode de représentation des résultats

La représentation des informations nécessite de considérer trois paramètres : la localisation, le temps (ou la date) et la variable (qualitative ou quantitative). Dans le cas des variables 6 à 11 visant à évaluer les liens entre fronts, l'aspect temporel est déjà pris en compte puisque celles-ci représentent l'évolution d'un phénomène dans le temps (par exemple, on cherche à évaluer quelle part de la déforestation est expliquée par l'expansion agricole entre 2000 et 2006). Il n'y a donc que deux paramètres à prendre en compte (la localisation et la variable) qui peuvent être simplement cartographiés.

Par contre, dans le cas des variables 1 à 5 visant à cartographier les différents fronts et dans le cas de la cartographie du front pionnier, les trois paramètres sont à prendre en compte. Pour une représentation en deux dimensions, il est nécessaire de fixer un des trois paramètres. De la sorte, chaque méthode est limitée puisqu'elle engendre une perte d'information. La manière la plus simple de représenter l'évolution du front est de fixer soit la localisation, soit le temps. Si on fixe la localisation, on étudie simplement l'évolution de la variable dans le temps. Cette méthode s'applique à une étude à échelle régionale (Mato Grosso ou biome) ou à une localité agraire pour illustrer les phases successives qui composent le front pionnier.

Fixer le temps revient à créer des cartes annuelles d'occupation du sol en attribuant à chaque unité spatiale la valeur du pixel (par exemple, le taux de déforestation au sein d'une cellule de $0,25^\circ$). Cette représentation est intéressante pour établir la répartition spatiale de l'occupation du sol à une date donnée mais elle est limitée pour l'étude de la dynamique temporelle. Il faut en effet comparer les cartes de différentes années ce qui n'est pas toujours aisé. Une solution pour représenter les dynamiques spatiale et temporelle sur une même carte consiste à cartographier la variation de la variable sur une période de temps donnée, comme dans le cas des variables 6 à 11 (par exemple, on peut mesurer l'expansion des surfaces

agricoles entre 2000 et 2006 par unité spatiale). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas d'observer les variations de la dynamique au cours de la période d'étude (par exemple, il n'est pas possible d'observer si l'expansion des surfaces agricoles sur une unité spatiale s'est faite au début de la période d'étude ou à la fin).

Une autre représentation est donc proposée pour mieux analyser la dynamique spatio-temporelle des fronts. Il s'agit ici de fixer un seuil pour la variable considérée et de détecter à quelle année ce seuil est franchi. L'année est alors attribuée à la valeur de la cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, ce qui permet de repérer sur une même carte la localisation et la période de passage d'un front. Le seuil déterminé dans cette thèse est de 50% pour toutes les variables car il indique que le type d'occupation ou d'utilisation du sol pris en compte est devenu majoritaire sur l'espace considéré. L'application de cette méthode est illustrée en figure 3.10 dans le cas du front économique. Cependant, la principale limite de cette méthode est qu'elle ne permet pas de représenter la profondeur du front, qui est considéré comme une simple ligne basée sur un seuil fixe.

En conséquence, les modes de représentation proposés se montrent complémentaires pour cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au sein d'un front pionnier. Il a donc été choisi de créer des planches composées de cartes réalisées à partir de ces différentes méthodes.

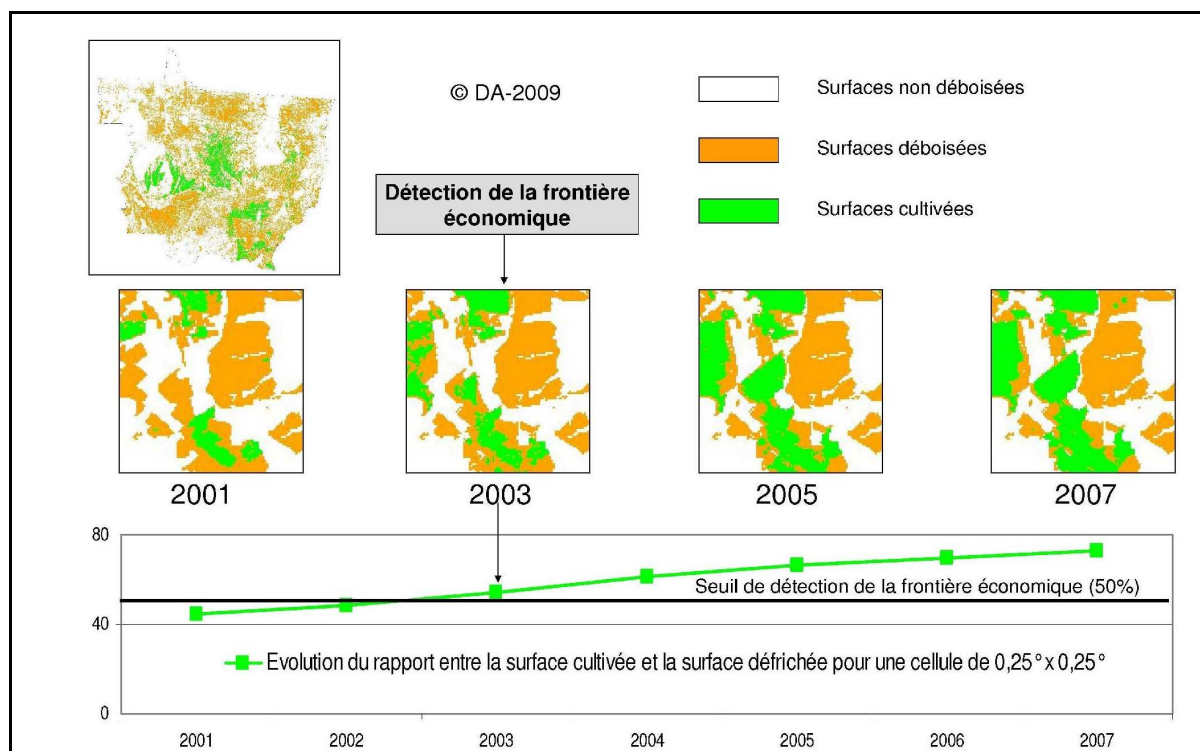


Figure 3.10 : Présentation de la méthodologie de détection du front économique.

3.3.2. L'interpolation spatiale des résultats

Les méthodes d'interpolation consistent à estimer la valeur d'un attribut pour des sites non échantillonnés situés à l'intérieur des limites définies par les positions des sites échantillonnés. Pour ce faire, l'interpolation repose sur le principe d'autocorrélation spatiale. Selon ce principe, des objets rapprochés dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Ces méthodes sont majoritairement utilisées en géographie pour rendre une

information spatiale (ou temporelle) ponctuelle généralisable à l'ensemble d'un maillage régulier.

Cependant, en télédétection, ces méthodes peuvent aussi être utilisées pour transformer une carte constituée de maillages réguliers en une carte en isolignes ou en isosurfaces. Dans tous les cas, une analyse locale des données est nécessaire, et surtout le choix de la méthode est très important. Dans ce cas précis, la méthode des Splines semble être la plus pertinente (Droesbeke *et al.*, 2006). Cette méthode est constituée sur le principe d'une interpolation mathématique locale exacte ou approximative. C'est-à-dire que les valeurs inconnues (à interpoler) sont estimées à partir d'un voisinage de points échantillonnés (ici les matrices issues des traitements par télédétection) ; le résultat de l'interpolation fournissant, selon les choix de l'utilisateur, des valeurs d'échantillonnage originales préservées, ou non. Afin de ne pas influencer les résultats fournis par les traitements télédétections, les valeurs d'échantillonnage originales sont conservées.

La méthode d'interpolation des Splines permet de générer des courbes ou des surfaces continues en joignant des points d'attributs constants (exemple : courbes de niveau). Cette méthode s'ajuste parfaitement à une fonction d'adoucissement sur un ensemble de points. Elle permet de créer des isolignes ou des isosurfaces qui passent à proximité de ces points de façon à en adoucir le tracé. Ce sont des fonctions dites « piecewise » parce qu'elles sont spécialement conçues pour s'ajuster à un faible nombre de points, ce qui présente un avantage très intéressant dans le cas de données à basse résolution spatiale, comme c'est le cas avec la résolution de 0,25 que nous avons choisi (Atteia et Gaches, 2003). En outre, la méthode des Splines est préférée à l'interpolation polynomiale, car elle permet d'obtenir des résultats similaires en se servant de polynômes ayant des degrés inférieurs, tout en évitant le phénomène de Runge (une augmentation du nombre de points d'interpolation ne constitue pas nécessairement une bonne stratégie d'approximation de la fonction ; Droesbeke *et al.*, 2006). Le phénomène de Runge met en lumière le fait que l'interpolation polynomiale n'est pas bien adaptée à l'approximation de fonctions. Pour approcher une fonction avec des polynômes, il est préférable d'utiliser des Splines (méthode basée sur des polynômes par morceaux). Dans ce cas, pour améliorer l'approximation, le nombre de morceaux, et non le degré des polynômes, est augmenté par le degré de tension qui est appliqué aux données d'implémentation.

La méthode des Splines est donc utilisée pour approcher des contours complexes. Sa simplicité d'implémentation la rend très populaire et elle est fréquemment proposée dans les logiciels de cartographies. Dans notre cas, cette méthode permet d'approcher les contours complexes des limites entre divers types d'occupation des sols au Mato Grosso, sans générer une information spatiale inexistante ou des contours fictifs. Elle permet de développer des contours par isolignes ou isosurfaces en restant très proche des données de base. Un exemple d'application est présenté en figure 3.11.

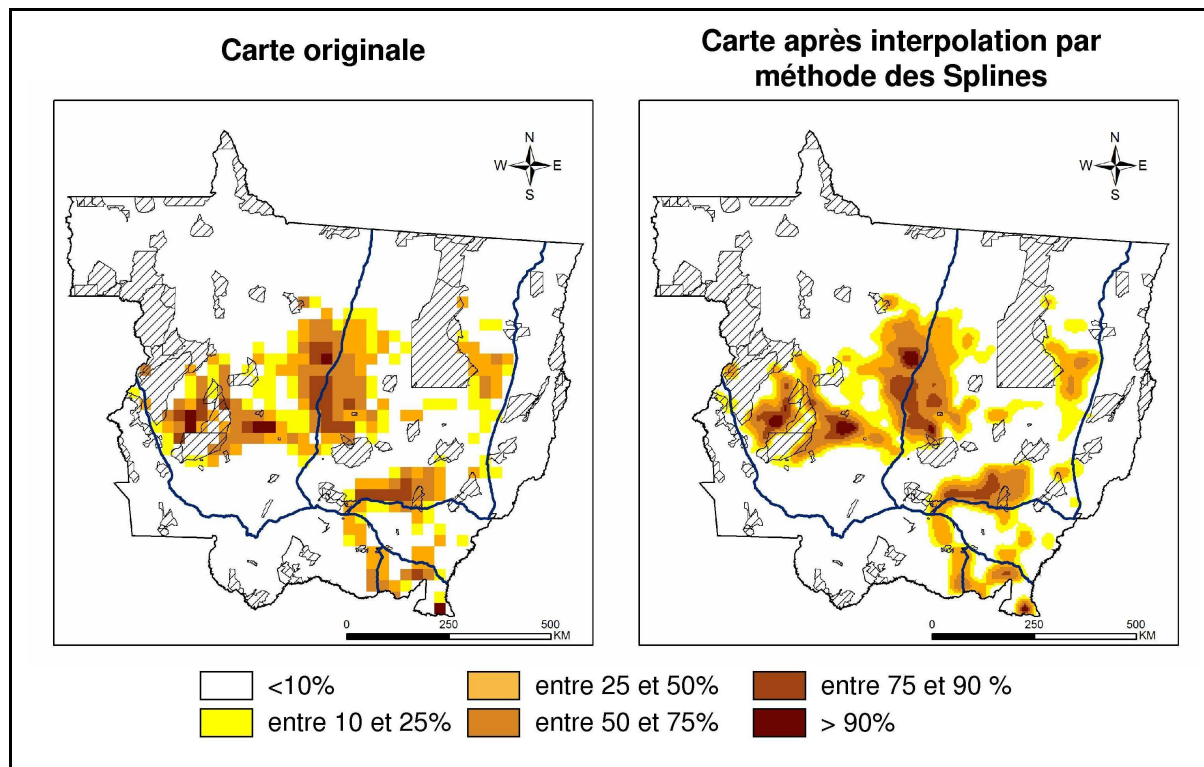


Figure 3.11 : Illustration de l'application de la méthode d'interpolation des Splines aux cartes originales à la résolution de $0,25^\circ$. Les pourcentages représentent le rapport entre les surfaces agricoles et les surfaces déboisées par cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Cette carte est représentée (fig. 3.17 et commentée dans le chapitre suivant).

4. Conclusion

L'étude du front pionnier est effectuée à partir du suivi des fronts d'ouverture, économique et d'intensification. L'évolution de ces fronts est analysée à l'échelle régionale et à l'échelle de la localité agraire, laquelle est représentée par une cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. L'occupation du sol est considérée comme représentative du stade de l'évolution du front pionnier à laquelle se situe un territoire. Toutefois, l'application d'une telle hypothèse nécessite l'utilisation de données multi-sources. Par exemple, les données de déforestation ont été obtenues auprès de l'INPE, de la SEMA et de l'IMAZON. Une phase de validation des cartes de déforestation et de végétation a donc été réalisée. Ces données viennent s'ajouter aux cartes d'occupation du sol issues des classifications des images MODIS TERRA/EVI qui ont déjà été validées dans la partie 2 de cette thèse.

La méthodologie employée à partir de ces données s'articule en trois étapes. Dans un premier temps, la progression des fronts est évaluée de manière indépendante à travers le suivi de l'évolution de l'occupation du sol de cartes forêt/non forêt, culture/non culture et agriculture intensive/agriculture non intensive. Dans un deuxième temps, les interrelations entre ces fronts sont évaluées à partir de variables visant à expliquer le rôle moteur joué par un front sur un autre (par exemple, en expliquant comment l'avancée du front économique explique l'avancée du front d'ouverture). Enfin, le front pionnier est cartographié en déterminant le pourcentage d'occupation du sol représenté par chaque variable (forêt, déboisement, agriculture non intensive et agriculture intensive) au sein d'une unité spatiale.

Chapitre 9 : Cartographie des fronts d'ouverture, économique et d'intensification

1. Introduction

Dans ce chapitre, l'avancée des fronts d'ouverture, économique et d'intensification est considérée de manière indépendante. Le suivi de la progression du front d'ouverture consiste à quantifier l'évolution de la déforestation à partir des cartes de déforestation résultant de la combinaison des données présentées au chapitre précédent. Le front économique est cartographié à partir des classifications issues des données MODIS TERRA/EVI. Seules les classes cultures et non cultures sont prises en compte à ce stade de l'étude. Enfin, les mêmes classifications sont utilisées pour observer le front d'intensification. Pour cela, nous distinguons les surfaces cultivées en double cultures commerciales des autres surfaces agricoles.

La méthodologie présentée au chapitre précédent est finalement employée pour cartographier la progression des fronts qui composent le front pionnier. Pour chacun de ces fronts, les variables représentatives sont calculées à l'échelle régionale et à l'échelle locale.

2. Le front d'ouverture

2.1. Analyse à échelle régionale

Jusqu'en 2007, 347 924 km² de végétation naturelle ont été déboisés au Mato Grosso. Cela représente 38% de la superficie de l'Etat. Un croisement de la carte des surfaces défrichées avec la carte de la végétation naturelle au Mato Grosso réalisée dans le cadre du PRODEAGRO indique que tous les couverts végétaux naturels sont concernés par la déforestation (tableau 3.4). 37% des forêts (241 563 sur 583 197 km²) et 42% du *cerrado* (132 769 sur 318 843 km²) ont été déboisés. Ces chiffres sont comparables à ceux présentés par Ferreira et Huete (2004) selon lesquels 40% du *cerrado* brésilien aurait déjà été déboisé, en plus des 13% qui seraient utilisés comme pâturage naturel. Trois raisons expliquent pourquoi le *cerrado* a été proportionnellement plus défriché que la forêt :

- les conditions naturelles (relief, sols, végétation peu dense) facilitent le déboisement et sont propices au développement de l'agriculture mécanisée (Moreno et Higa, 2005) ;
- le *cerrado* est situé dans la partie sud du Mato Grosso et a donc été colonisé plus tôt que la forêt ;
- le *cerrado* est administrativement moins protégé que la forêt.

Ce dernier point est important car, même si il est affirmé que la biodiversité du *cerrado* est très riche et encore largement méconnue, seulement 47 106 km² de *cerrado* (15% de la superficie totale couverte par ce biome au Mato Grosso) sont localisés dans des espaces protégés, i.e. des territoires indigènes ou des unités de conservation, contre 115 161 km² pour le biome forêt (20% du total des forêts au Mato Grosso). A l'échelle du Brésil la situation est encore plus alarmante puisque seulement 5,2% du *cerrado* est protégé (Jepson, 2005).

Au total, 163 860 km² sont protégés au Mato Grosso dont 131 238 km² en tant que territoire indigène et 32 622 km² en unité de conservation. D'après la carte (fig. 3.12), ces

espaces protégés représentent les derniers endroits où la végétation naturelle est maintenue au Mato Grosso. Cela confirme donc les conclusions de Schwartzmann *et al.* (2000), Schwartzman et Zimmerman (2005) et Nepstad *et al.* (2006a) mettant en avant l'efficacité de ces réserves pour protéger la végétation.

Cette protection efficace se confirme statistiquement puisque « seulement » 6% de la superficie totale des aires protégées est défrichée, ce qui représente tout de même 9 741 km². La protection est en fait plus efficace dans les terres indigènes (4% du total) que dans les unités de conservation environnementales (13% du total déboisé). Ceci indique donc que la présence de populations traditionnelles est désormais un gage de protection environnementale comme le proposent Schwartzman et Zimmerman (2005).

Néanmoins, certaines terres indigènes connaissent des pourcentages de déforestation élevés. Par exemple, les terres indigènes Manoke (centre-ouest) et Mar-Iwatsede (nord-est) montrent des taux de déboisement de 19% et 58% respectivement. Dans le cas du territoire Manoke (des indiens Irantxe), le territoire a été délimité tardivement et un certain nombre de fazendas occupaient déjà cet espace avant sa création. Ce territoire symbolise ainsi les rapports conflictuels existants entre les amérindiens et les fazendeiros. Cependant, il existe des contre-exemples comme le prouve le cas des indiens Parecis, habitant la terre indigène Utiariti. Ceux-ci ont contacté les producteurs des communes voisines de Sapezal et Campo Novo do Parecis afin de leur proposer un accord les autorisant à semer 18 000 ha de soja sur leur territoire (Le Tourneau, 2006). Le débat sur la protection de l'environnement par la création de réserves protégées prend donc tout son sens au Mato Grosso.

		Total (km ²)	Défriché en 2007 (km ²)	% défriché en 2007
Mato Grosso	Total	905 287	347 925	38%
	Forêt	583 197	214 564	37%
	Cerrado	318 844	132 769	42%
Terres indigènes (TI)	Total	131 238	5 537	4%
	Forêt	99 651	3 444	3%
	Cerrado	30 377	2 064	7%
Unités de Conservation (UC)	Total	32 622	4 205	13%
	Forêt	15 510	1 575	10%
	Cerrado	16 730	2 574	15%
Aires protégées (TI + UC)	Total	163 860	9 742	6%
	Forêt	115 161	5 019	4%
	Cerrado	47 106	4 638	10%
Projets d'Assentamentos	Total	35 857	21 024	59%
	Forêt	28 752	18 186	63%
	Cerrado	6 973	2 798	40%

Tableau 3.4 : Bilan de la déforestation au Mato Grosso en 2007 par type de végétation et statut administratif.

Par ailleurs, l'INCRA recense 383 projets *d'assentamentos* au Mato Grosso pour une superficie totale de 41 800 km². Sur les cartes des *assentamentos* fournies par ce même organisme, seulement 259 projets sont cartographiés, représentant 35 856 km² (soit 86% des

assentamentos déclarés). Les cartes de déforestation montrent que 59% (21 024 km²) de cette superficie a été défrichée jusqu'en 2007. Contrairement à ce qui est observé à l'échelle du Mato Grosso, la déforestation est plus importante en forêt (63% de déforestation) qu'en cerrado (40% de déforestation). Ces chiffres sont cohérents avec ceux présentés par Brandão et Souza (2006) selon lesquels 62% des projets *d'assentamentos* situés dans les forêts matogrossenses étaient déjà défrichés en 2004. Enfin, en appliquant le rapport de 59% de déboisement au total des 41 800 km² *d'assentamentos* recensés par l'INCRA au Mato Grosso, il s'avère que ces projets de colonisation publique sont responsables d'environ 7% de la déforestation totale dans l'Etat.

Les forts taux de déforestation observés au Mato Grosso sont le résultat de plus de quarante ans de politique d'occupation du territoire organisée par l'Etat et les organismes privés (Droulers, 2001 ; Clairay, 2003 ; Théry, 2005 ; Nédélec, 2005 ; Dubreuil, 2005). Les vingt dernières années témoignent notamment d'une forte intensification de la déforestation liée à l'arrivée de nouveaux migrants, l'emploi de nouvelles techniques de défrichement et l'envolée des cours du soja. Les données de déforestation permettent de ressortir cette tendance à l'intensification de la déforestation.

Ces données étant conçues à partir de sources diverses, il est compliqué de réaliser un suivi annuel de la déforestation. Il existe en effet une variabilité interannuelle liée à l'utilisation de différentes sources au cours de la période d'étude. Pour atténuer cette variabilité, il est préférable d'évaluer des sous-périodes telles que 1993-1999 et 1999-2005 (tableau 3.5). Notons que les années 2006 et 2007 ne sont pas prises en compte car les données sont incomplètes puisque seul le biome forêt a été considéré à partir des données de l'INPE et de l'IMAZON.

Déforestation :	Déforestation annuelle par périodes (km ²)			Evolution de la déforestation au cours de la période d'étude
	1993-1999	1999-2005	1993-2005	1993-2005
au Mato Grosso	12765	14839	13722	+ 108 %
en région de forêt	7727	11443	9442	+ 138 %
en région de Cerrado	5013	3368	4253	+ 72 %
dans les Terres indigènes	216	366	285	+ 227 %
dans les Unités de Conservation	200	164	184	+ 134 %
dans les Aires protégées	416	531	469	+ 179 %
dans les Assentamentos	786	1511	1121	+ 236 %

Tableau 3.5 : Evolution de la déforestation au Mato Grosso entre 1993 et 2005.

Les superficies déboisées au Mato Grosso ont augmenté de 108% entre 1993 et 2005, passant de 165 716 à 344 101 km². Ce sont donc en moyenne 13 722 km² de végétation naturelle qui ont été détruits annuellement. Le biome le plus touché est la forêt qui perd en moyenne 9 442 km² par an contre 4 253 km² pour le cerrado. Cette différence s'explique par les superficies totales couvertes par ces biomes (la forêt recouvrant un espace plus grand que le *cerrado*, il est normal que la déforestation en valeur absolue y soit supérieure). De plus, il y a eu une augmentation des actes de déboisement au cours de la période 1993-2005. Les valeurs annuelles sont passées de 12 765 km²/an sur la période 1993-1999 à 14 839 km²/an après 1999. Cette augmentation est notamment due à la hausse des cours du soja sur la

période considérée qui a incité les producteurs à déboiser (cf Partie 1-Chapitre 4). La déforestation s'est surtout intensifiée en forêt (7 727 km² sur la période 1993-1999 contre 11 443 km² après 1999). Au contraire, la déforestation du *cerrado* a baissé, passant de 5 013 à 3 368 km² par an sur les mêmes périodes. En conséquence, la déforestation en forêt a augmenté de 138% (contre 72% pour le *cerrado*) entre fin 1992 et 2005, expliquant en grande partie l'augmentation des déboisements à l'échelle du Mato Grosso. Le fait que les déboisements soient plus présents en région de forêt correspond à l'avancée vers le nord du front pionnier de déforestation. Cette avancée s'explique par le fait que le *cerrado* ayant déjà été largement exploré (42% défriché en 2007), la forêt est devenue le nouvel espace à exploiter.

La déforestation s'est également intensifiée dans les aires protégées (+179% entre 1993 et 2005), aussi bien dans les terres indigènes (+227%) que dans les unités de conservation (+134%). Ainsi, si il est vrai que les aires protégées sont moins impactées par la déforestation que les zones non protégées, il convient de préciser qu'elles ne sont pas totalement épargnées. Dans les *assentamentos*, la situation est similaire puisque l'augmentation a été de 236%. Cette forte croissance est due au grand nombre de projets créés au cours de la période 1999-2005, expliquant ainsi les forts taux de déboisements annuels dans ces espaces ces dernières années (1 511 km²/an).

2.2. Analyse à échelle locale

L'étude de la déforestation à l'échelle du Mato Grosso a permis de mettre en avant des rythmes différents entre biomes qui révèlent l'existence d'une dynamique spatio-temporelle qui doit être étudiée à une échelle plus locale. La figure 3.13 construite à partir des cartes de déforestation issues des différentes sources présentées au chapitre 1 représente la variabilité spatiale de la déforestation. Celle-ci est bien répartie sur l'ensemble du territoire matogrossense et seules les aires protégées sont épargnées. Ces mêmes données sont utilisées en appliquant la méthodologie présentée au chapitre 1 afin d'observer l'avancée du front d'ouverture à l'échelle de la localité agraire. La carte est divisée en cellules de 0,25° x 0,25° et le taux de déforestation est calculé pour chacune d'entre elles.

D'après les cartes des figures 3.13.A et 3.13.C, il reste encore de nombreux espaces naturels (où moins de 10% de l'espace est défriché) en 1992. La déforestation se concentre au sud de l'Etat, i.e. dans le *cerrado*. On remarque notamment deux méga-clairières (Clairay, 2003) au sud-est (autour de Rondonopolis et Campo Verde) et au sud-ouest (région de Caceres). Ces zones de déforestation plus anciennes sont liées à l'ouverture des routes BR-070 et BR-364 dès les années 1960, dans le cadre des premiers projets d'occupation de l'Amazonie. L'ouverture plus tardive des routes BR-163 et BR-158, dans les années 1970, explique pourquoi la déforestation y est moins présente en 1992. On y repère toutefois quelques enclaves défrichées dans la région de Sorriso, au centre de l'Etat, dans la région d'Alta Floresta, au nord, et dans la région de Canarana, à l'est. La région de Juina au nord-ouest commence également à être touchée. En résumé, au début des années 1990, la déforestation affectait surtout le biome de *cerrado* tandis que la forêt était encore majoritairement conservée même si quelques clairières commençaient à apparaître.

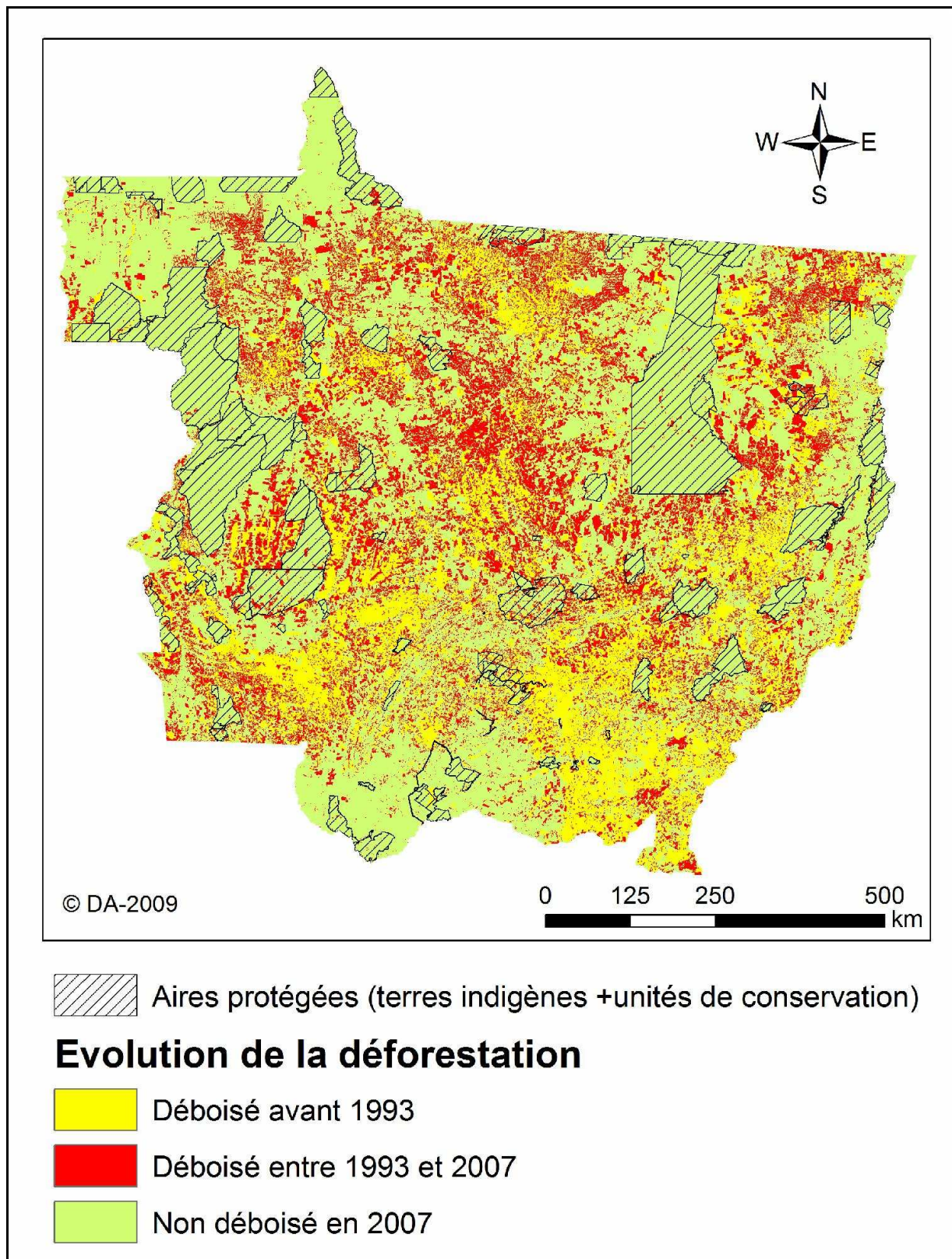


Figure 3.12 : Carte de la déforestation au Mato Grosso en 1992 et 2007.

Les quatorze années qui suivent sont marquées par une forte augmentation de la déforestation. Celle-ci s'est accrue dans le sud du pays où seul le Pantanal semble être encore épargné. Les méga-clairières repérées au sud-est et au sud-ouest de l'Etat se sont agrandies, s'étendant vers le nord, notamment vers la Chapada dos Parecis. En forêt, les quelques

enclaves repérées en 1992 se sont considérablement étendues de telle sorte que, en 2006, c'est la forêt qui forme des enclaves au milieu d'un espace presque entièrement anthropisé (fig. 3.13.A). La déforestation s'est répandue à partir des centres déboisés déjà observés en 1992. La méga-clairière de Sorriso est aujourd'hui proche de rejoindre celle de la Chapada dos Parecis. La création progressive d'une nouvelle route (MT-242) reliant Sorriso à la BR-158 et traversant donc la moitié Est de l'Etat selon un axe ouest-est devrait également accélérer la fusion de la méga-clairière de Sorriso avec celle du Sud-est. Au nord, la région du Portail de l'Amazonie a vu se développer la déforestation à partir des méga-clairières d'Alta Floresta et de Juina. On remarque ainsi que la déforestation entre 2000 et 2006 a été particulièrement importante dans toute la zone forestière de l'Etat (fig. 3.13.B). Les régions les plus touchées sont situées au nord de Sorriso (de part et d'autre de la route BR-163) et dans la région de Querencia où plus de 30% de l'espace a été défriché entre 2000 et 2006.

Ainsi, toute la région située à l'ouest du parc du Xingu, du sud au nord, est affectée par la déforestation avec déjà plus de 25% des superficies défrichées. Cette expansion exerce une pression sur les terres indigènes de l'ouest de l'Etat et du Xingu qui représentent les derniers espaces vierges du Mato Grosso. Le parc du Xingu est aussi menacé à l'Est puisque la déforestation s'est considérablement accrue le long de la route BR-158. Cette situation risque de s'accroître car cette région pourrait accueillir un corridor d'exportation du soja dans les années à venir, notamment via l'exploitation du fleuve Araguaia (Fearnside, 2001 ; Bertrand *et al.*, 2004).

La carte de la figure 3.13.C résume la dynamique spatio-temporelle du front d'ouverture avec un seuil de 50% de déforestation. Les principales clairières observées en 1992 apparaissent clairement. Elles sont surtout présentes au Sud et le long de la BR-163. Après 1992, l'expansion du front à partir de ces clairières se fait vers le nord. Cependant elle se fait à des rythmes différents. Ainsi, les clairières du sud (Caceres et Rondonopolis) ont quasiment atteint leurs limites actuelles en 1996. Au contraire, les clairières du centre et du nord (Sorriso, Alta Floresta) ont connu une très forte expansion sur la période 1996-2001 qui se poursuit encore jusqu'en 2006. Enfin, les régions de Juina et surtout de Querencia ont connu une très forte progression du front d'ouverture sur la période 2001-2006.

La figure 3.13 permet donc de représenter quelques unes des principales caractéristiques de la dynamique spatio-temporelle d'un front d'ouverture :

- des rythmes de progression variés selon les régions ;
- une discontinuité spatiale du front qui progresse par bonds dans la forêt, créant des enclaves qui s'unifient au bout d'un certain temps pour créer des méga-clairières.

Enfin, les cartes mettent en avant le rôle d'aménageur joué par l'Etat puisque les zones défrichées apparaissent le long du réseau routier et s'élargissent en s'étendant de chaque côté des routes. La colonisation du Mato Grosso s'inscrit donc complètement dans le processus de formation de l'Amazonie des routes. Ce sont ces axes qui façonnent l'expansion du front pionnier et les seules entraves à sa progression sont les aires protégées, et surtout la réserve du Xingu qui, de par sa position centrale, empêche la progression continue du front vers le nord. Ces cartes témoignent donc du rôle contradictoire joué par l'Etat dans l'organisation de la conquête amazonienne. Il est à la fois le moteur de l'avancée du front par la construction d'infrastructures qui permettent le développement économique et le principal frein de ce front par les réserves indigènes et environnementales qu'il crée au sein du front pionnier.

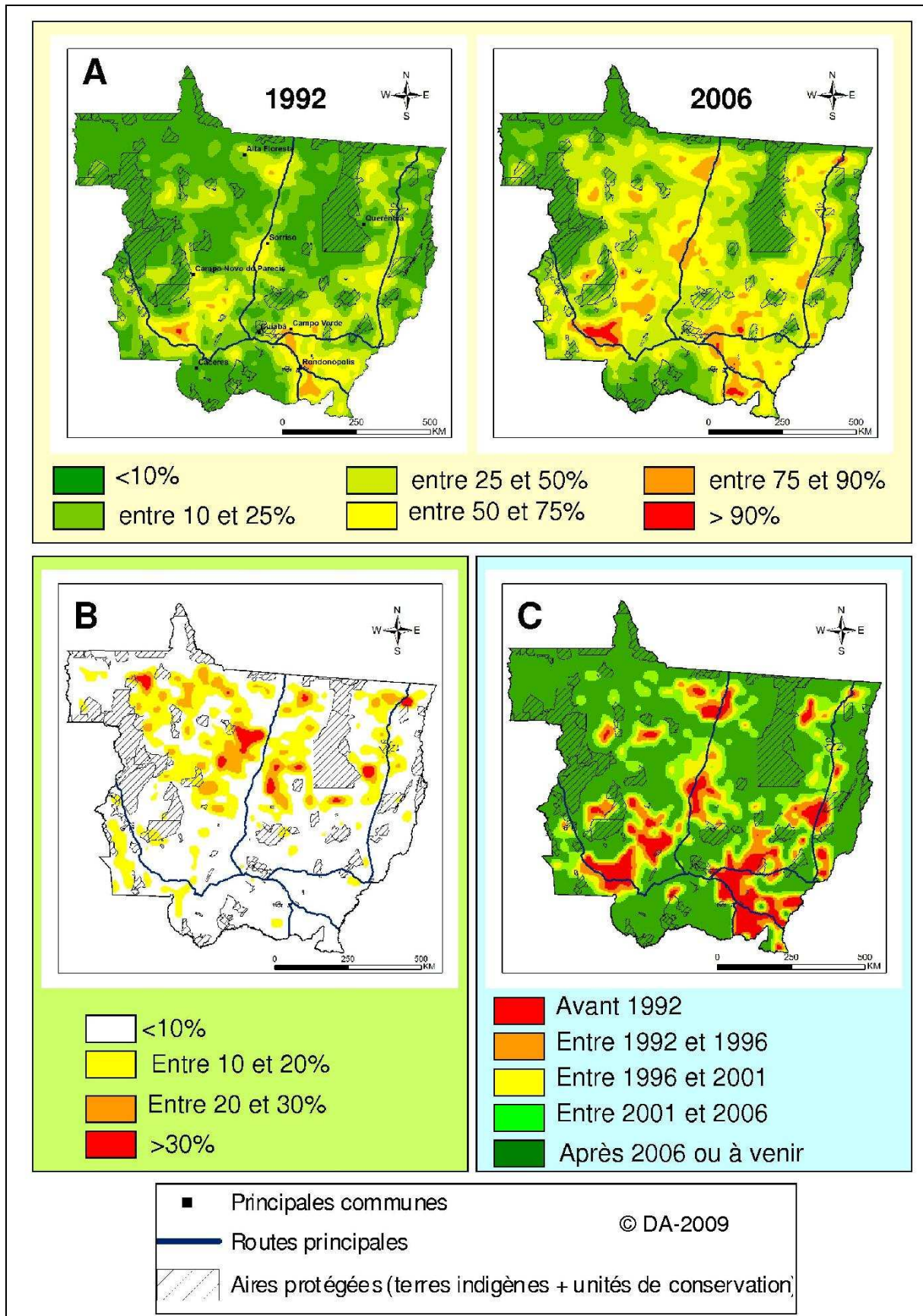


Figure 3.13 : (A) Pourcentage de végétation déboisée au Mato Grosso en 1992 et 2006 ; (B) Pourcentage de territoire déboisé entre 2000 et 2006 ; (C) Période au cours de laquelle le seuil de 50% de déboisement est franchi.

3. Le front économique : l'expansion agricole au Mato Grosso

3.1. Analyse à l'échelle régionale

En 2006-2007, la classification appliquée aux images MODIS/EVI a détecté 5 617 250 hectares de surfaces agricoles au Mato Grosso. Le maximum de la période d'étude est observé en 2005-2006 avec 6 114 000 ha. Les surfaces agricoles ont augmenté de 56% entre 2000-2001 et 2005-2006 avant de baisser légèrement lors de la récolte 2006-2007, suite à la crise économique présentée en Partie 1-Chapitre 4 (fig. 3.14). Cette forte évolution à l'échelle régionale cache des évolutions différenciées selon les biomes considérés. A l'instar du front d'ouverture, l'avancée de la frontière agricole s'oriente vers le nord, i.e. vers la forêt. Alors qu'en 2000-2001, 24% des cultures étaient situées en région de forêt, ce pourcentage atteint 36% en 2006-2007 (fig. 3.15.A.). Dès lors, même si en 2007 l'agriculture est encore majoritairement présente dans le *cerrado* (64% des surfaces agricoles), il convient de signaler que 65% de l'expansion de l'agriculture mécanisée au Mato Grosso (1 675 000 ha) s'est faite en région forestière entre 2000 et 2007. Plus précisément, il y a eu un changement radical du mode d'expansion des cultures sur cette période comme l'illustre la figure 3.15.B. En 2001-2002, 60% des nouvelles parcelles agricoles se trouvaient dans le biome de *cerrado*. A l'inverse, en 2006-2007, 68% des nouvelles parcelles agricoles étaient localisées en région forestière.

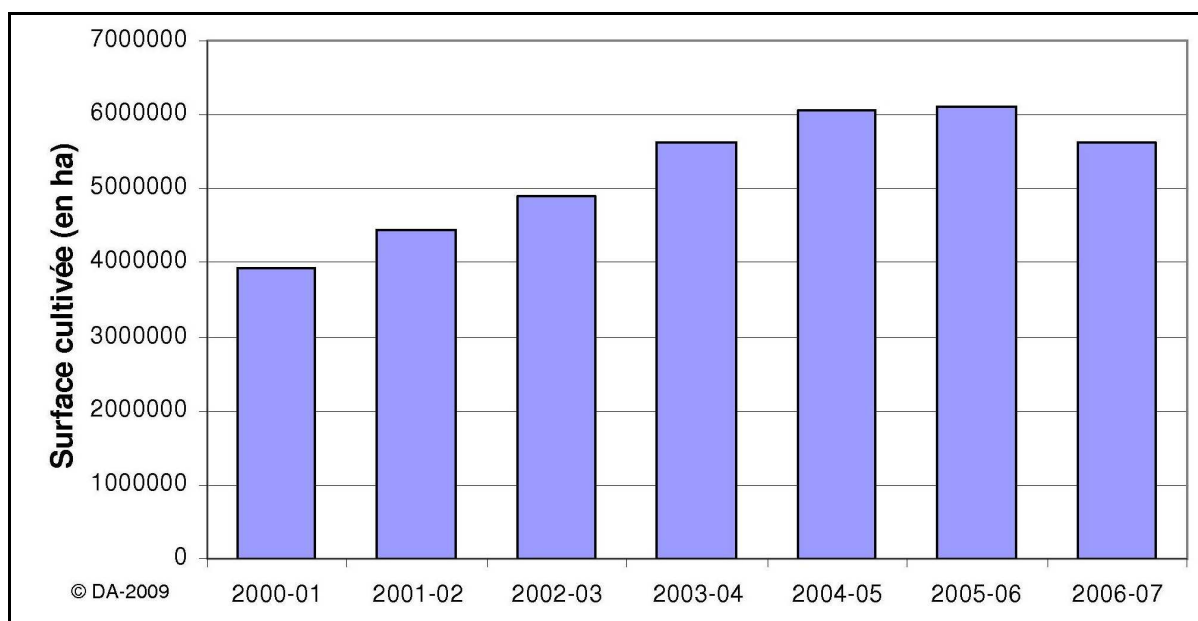


Figure 3.14 : Evolution des superficies cultivées au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.

3.2. Analyse à l'échelle locale

La dynamique spatio-temporelle de l'avancée de la frontière économique est encore plus différenciée à l'échelle locale. En 2007, 10 communes, soit 7% des communes de l'Etat, représentent 50% des surfaces cultivées et 36 communes (25% du total des 141 communes matogrossenses) sèment 90% des cultures. Il existe donc une forte concentration de la filière agricole. La figure 3.16 permet de distinguer quatre grandes régions de production agricole au Mato Grosso.

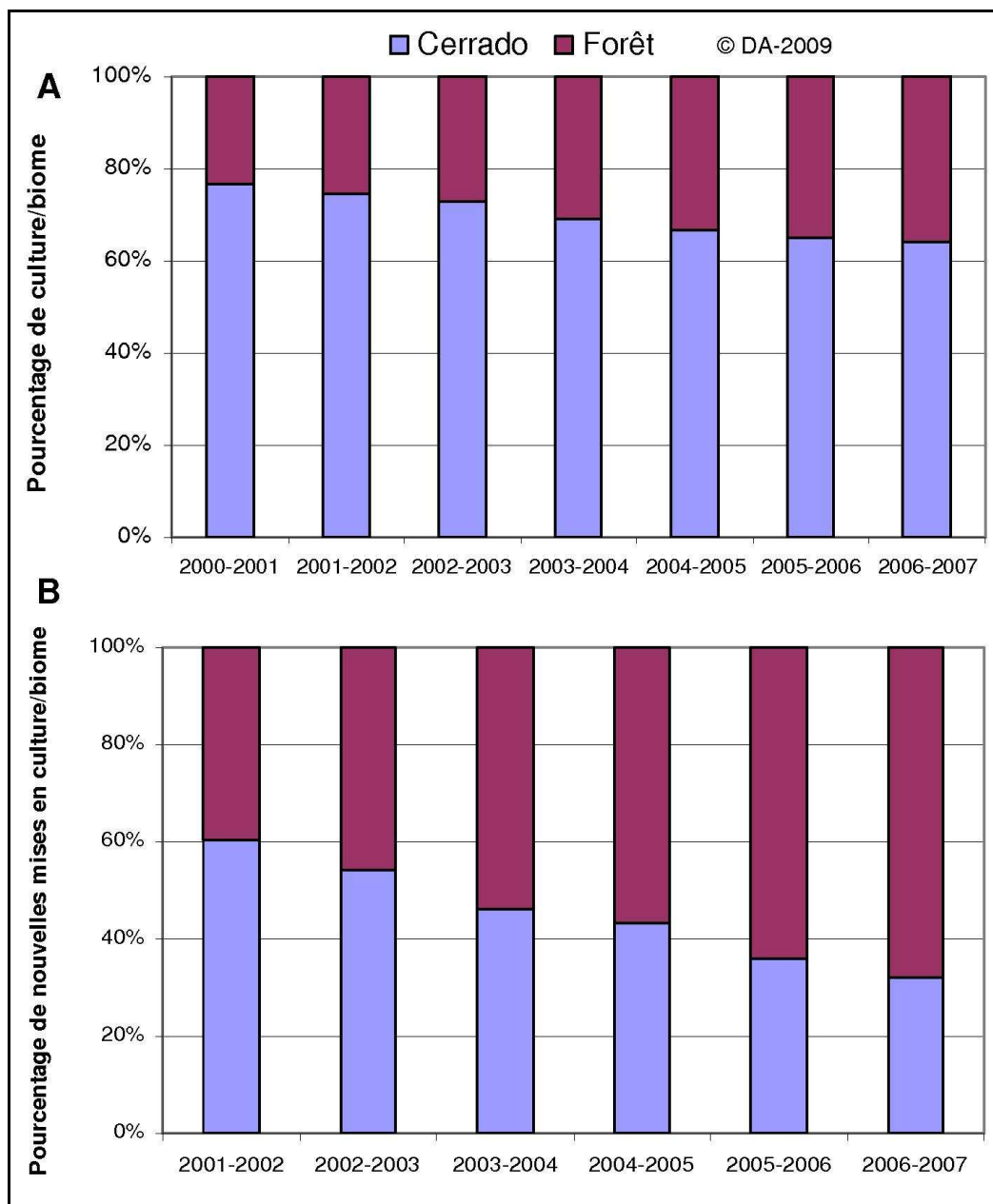


Figure 3.15 : Evolution des superficies cultivées en biome forêt ou cerrado entre 2000-2001 et 2006-2007.

La plus grande région agricole est située le long de la BR-163, au centre du Mato Grosso. Elle se concentre autour de grandes communes de production telles que Sorriso, Lucas do Rio Verde, Nova Mutum ou Sinop qui sont des « centres historiques » de la culture du soja au Mato Grosso.

La deuxième région de production agricole est située sur la Chapada dos Parecis, à l'ouest de l'Etat. Les productions se concentrent notamment à Campo Novo do Parecis et à Sapezal, cette dernière étant caractérisée par la présence de grands groupes industriels tels que Amaggi ou Sementes Bom Futuro qui y cultivent de très grandes superficies (plusieurs dizaines de milliers d'hectares).

Le troisième pôle agricole est situé au sud-est de l'Etat, le long des routes BR-364 et BR070. Il comprend notamment les communes de Campo Verde, Primavera do Leste, Itiquira, et Rondonopolis.

Enfin, une dernière région agricole s'est formée à l'est de la réserve indigène du Xingu, le long de la BR-158. Elle est centrée sur la commune de Querencia qui a connu une forte croissance des surfaces cultivées avec l'arrivée du groupe Amaggi en 2004.

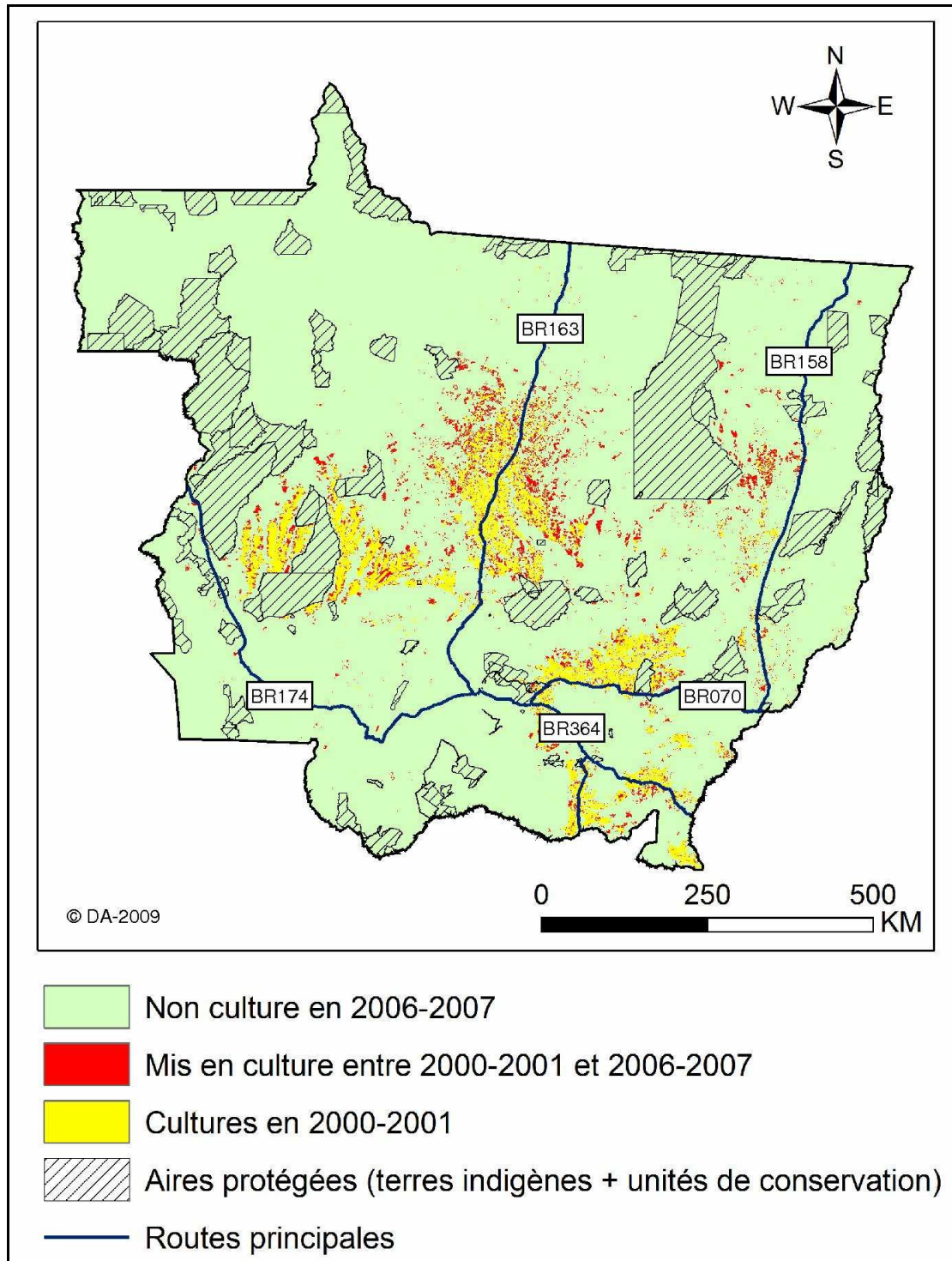


Figure 3.16 : Evolution des surfaces agricoles au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.

Même si l'augmentation des surfaces cultivées est forte dans toutes les régions agricoles, il existe des rythmes de développement propres à chaque commune. D'un côté, les six plus grandes communes agricoles en 2000-2001 sont encore les six plus grandes communes agricoles en 2006-2007. Il s'agit de Sorriso, Sapezal, Campo Novo do Parecis, Nova Mutum, Diamantino et Primavera do Leste. Cependant, alors qu'elles représentaient 44% (1 722 400 ha) des terres cultivées au Mato Grosso en 2001, elles ne représentaient plus que 36% de ce total en 2007, soit 2 011 000 ha. Malgré une augmentation de 16% des surfaces agricoles, elles ont donc perdu de leur poids à l'échelle du Mato Grosso et n'expliquent que 17% du total de l'expansion agricole entre 2001 et 2007. D'un autre côté, quatre communes (Nova Ubiratã, Querencia, Ipiranga do Norte, Vera) ont augmenté leurs superficies cultivées de 417 430 ha (+194%), soit 24,5% de l'expansion agricole au Mato Grosso sur la même période.

Ces conclusions apparaissent également à l'échelle de la localité agraire (fig. 3.17). En 2000-2001, seules trois régions agricoles apparaissent clairement : (i) la région centre, le long de la BR-163, (ii) la Chapada dos Parecis à l'ouest et (iii) la région sud-est, autour de Rondonópolis. Au cœur de ces noyaux agricoles, l'agriculture représente déjà plus de 75% de l'utilisation du sol en 2000 (fig. 3.17.A). Ces noyaux s'étendent au cours des années suivantes, notamment dans la région centre qui enregistre une forte augmentation des surfaces cultivées (>100%) entre 2000 et 2006. Le front économique se dirige donc vers le nord, le long de la route BR-163, et vers l'est et l'ouest, de part et d'autre de cette même route (fig. 3.17.B). La région centre et la région de la Chapada dos Parecis se rejoignent alors pour ne former en 2007 qu'une seule région de production au sein de laquelle 25 à 50% des terres déboisées sont destinées à l'agriculture mécanisée (fig. 3.17.A). Cette région s'articule autour des deux noyaux historiques centrés sur les axes Sorriso-Lucas do Rio Verde et Campo Novo do Parecis – Sapezal (même si cet axe est coupé par la présence de la terre indigène Utiariti). Dans ces noyaux, l'augmentation des surfaces cultivées a été modérée (fig. 3.17.B) mais l'agriculture y représente tout de même jusqu'à 90% de l'utilisation du sol aujourd'hui (fig. 3.17. A).

A l'Est du Mato Grosso, la région de production de Querencia n'apparaît vraiment qu'entre 2001 et 2006, le long de la BR-158. Elle n'est pas encore complètement exploitée en 2006 puisque l'agriculture n'y représente pas 50% des terres ouvertes (fig. 3.17.A et 3.17.B). Cependant, son expansion est forte, supérieure à 100% entre 2000 et 2006 (fig. 3.17.B) et pourrait être accélérée dans les années à venir par l'ouverture d'un corridor d'exportation du soja par la BR-158 et par le fleuve Araguaia.

Au nord et au nord-ouest, les méga-clairières observées autour d'Alta Floresta et Juina (fig. 3.13) n'apparaissent pas sur la carte des surfaces agricoles car ce sont surtout l'élevage extensif et l'agriculture traditionnelle qui prédominent. L'agriculture capitaliste ne s'est pas développée pour le moment du fait du relief plus accidenté qui empêche la mécanisation.

En résumé, de nouveaux espaces sont régulièrement intégrés à l'espace agricole par l'avancée du front économique lié à l'augmentation des surfaces cultivées en soja. L'avancée du front ne se fait pas de manière continue dans l'espace. Elle s'organise autour de certains noyaux historiques de la production agricole au Mato Grosso. La progression du soja met alors en péril certaines aires protégées où les cultures sont semées en bordure des limites des réserves. C'est notamment le cas à l'est du parc du Xingu et autour de la terre indigène Utiariti, sur la Chapada dos Parecis. Cependant, la figure 3.16 indique que, pour le moment,

ces territoires protégés restent relativement épargnés. Par ailleurs, cette progression du soja ne se fait pas non plus de manière continue dans le temps. Elle connaît des phases d'expansion et de rétraction liées notamment à la conjoncture macro-économique (cours du soja, taux de change...) qui caractérisent l'avancée d'un front économique (cf Partie 1- chapitre 2). La figure 3.18 illustre ce phénomène en permettant d'observer le recul de la frontière du soja entre les récoltes 2005-2006 et 2006-2007. Ce recul a été ressenti sur l'ensemble des régions agricoles de l'Etat. Seuls les agriculteurs de la région de Querencia et de la région de Vera, à l'est de Sorriso, ont maintenu leurs surfaces agricoles.

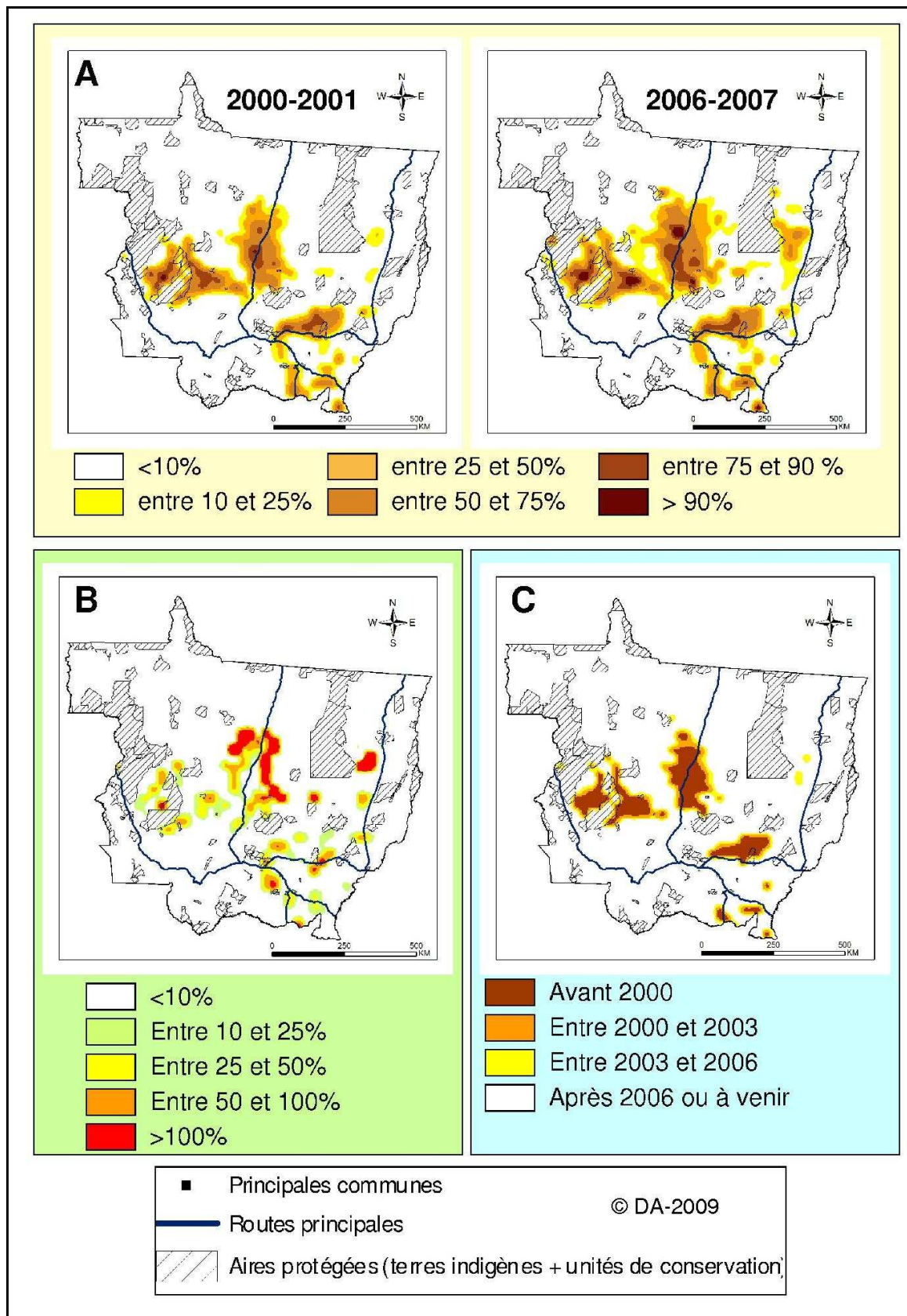


Figure 3.17 : Dynamique spatio-temporelle du front économique : (A) Evolution des surfaces cultivées par rapport aux surfaces déboisées en 2000-2001 et 2006-2007 ; (B) Evolution des surfaces cultivées entre 2000-2001 et 2006-2007 (en valeurs relatives) ; (C) Progression du front économique pour un seuil de surfaces cultivées de 50%.

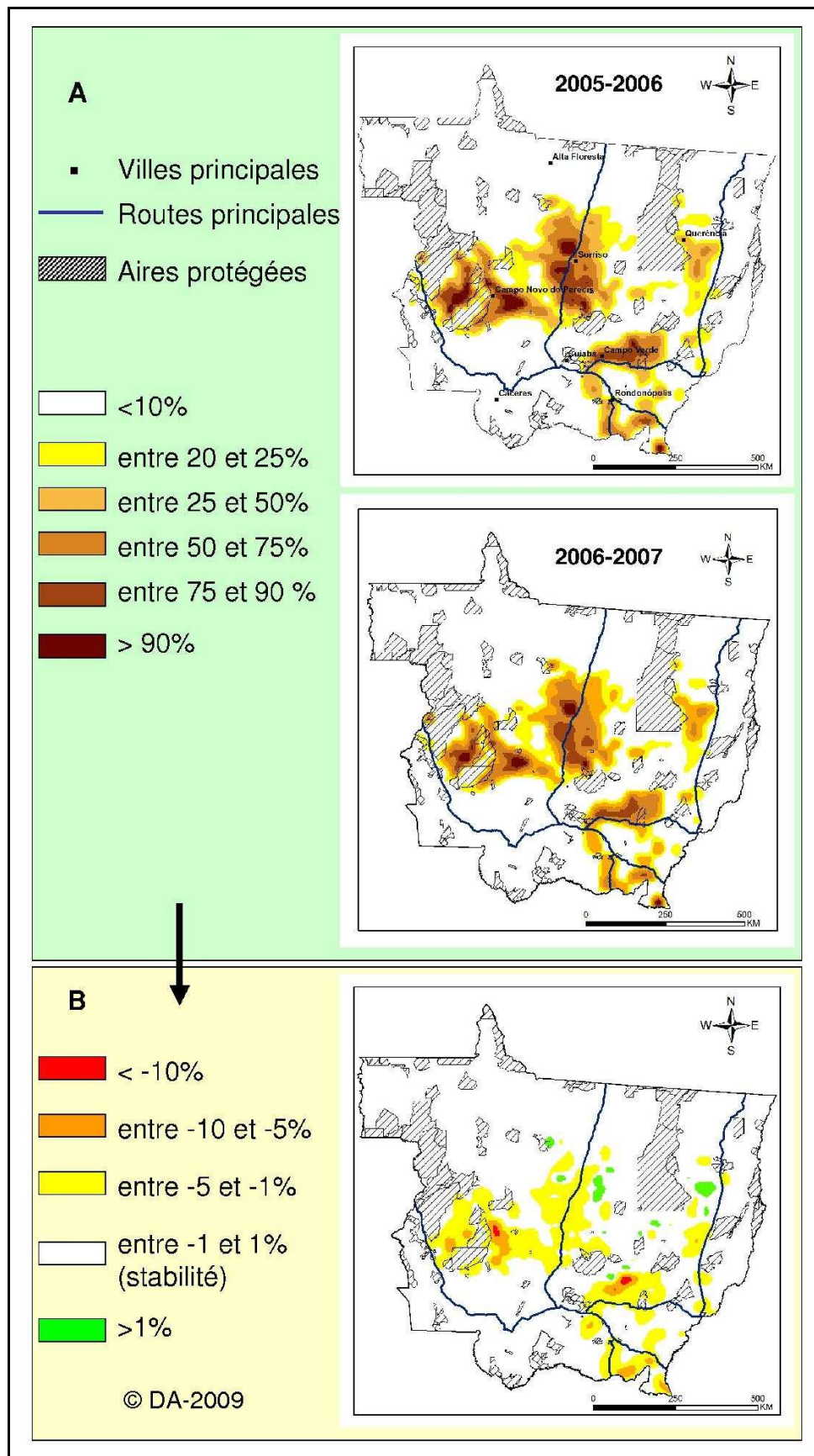


Figure 3.18 : (A) Cartes des surfaces cultivées par rapport aux surfaces déboisées en 2005-2006 et 2006-2007 et (B) Evolution des surfaces cultivées entre 2005-2006 et 2006-2007 (en valeurs absolues).

4. Le front d'intensification : évolution des pratiques agricoles au Mato Grosso

Si l'expansion des surfaces agricoles depuis 2000 a été importante au Mato Grosso, cette période s'est également accompagnée de nombreux changements dans les pratiques culturales. L'adoption de ces nouvelles pratiques vise à augmenter la production agricole, réduire la vulnérabilité économique de la filière agricole et protéger les services écosystémiques. Les variables 3, 4 et 5¹ présentées au chapitre 1 sont considérées comme des indicateurs de ces pratiques culturales et permettent d'évaluer la dynamique spatio-temporelle du front d'intensification agricole qui marque la dernière étape de l'évolution de la frontière agricole.

4.1. Analyse à l'échelle régionale

La diversification au Mato Grosso est surtout axée sur le développement des cultures de maïs et de coton qui ont une valeur économique. Le riz est également cultivé (288 000 ha en 2006 selon l'IBGE, soit 4% des surfaces cultivées) mais n'est pas considéré dans cette étude car il est surtout semé afin de préparer les sols avant la culture du soja. Les cultures de sorgho et de millet en succession du soja sont semées pour couvrir les sols en hiver et ne font donc pas partie du processus de diversification.

	2000-01	2006-07	Augmentation (ha)	Augmentation (%)
Soja	3525613	5200913	1675300	48%
Maïs	232519	1526713	1294194	557%
Coton	403475	574706	171231	42%
Total cultivé	3917963	5617250	1699288	43%
Total semé	4161606	7302331	3140725	75%

Tableau 3.6 : Evolution des surfaces cultivées en soja, maïs et coton au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007. (source : classification des séries temporelles MODIS TERRA/EVI)

L'augmentation des surfaces cultivées de ces différentes cultures indique que le secteur agricole est en cours de diversification au Mato Grosso (tableau 3.6). Le soja reste largement dominant en 2006-2007 avec 71% des surfaces semées et 53% de l'augmentation des surfaces semées entre 2000-2001 et 2006-2007, ce qui témoigne d'une situation de monoculture toujours d'actualité ; mais sa part dans le total des surfaces semées est en régression continue depuis 2000-2001 (fig. 3.19.A). Ce recul est compensé par une croissance des surfaces semées en coton et surtout en maïs. Ces constatations sont vérifiées par l'étude de l'évolution de l'indice de diversification qui est passé de 1,37 à 1,79 au cours de la période d'étude (fig. 3.19.B). Cet indice a notamment fortement augmenté entre les récoltes de 2005-2006 et 2006-2007 suite à la crise économique dont ont souffert les producteurs. Ceux-ci ont semé moins de soja tandis que les cours du maïs et du coton les ont incités à miser plus sur ces cultures. Le rapport entre ces trois cultures s'est donc équilibré entraînant une forte hausse

¹ Variable 3 : Rapport entre la surface cultivée en doubles cultures commerciales et le total des surfaces cultivées par unité spatiale

Variable 4 : Rapport entre la surface couverte en permanence et le total des surfaces cultivées par unité spatiale

Variable 5 : Indice de diversification par unité spatiale

de l'indice de diversification. Toutefois, on peut se demander si cette tendance se poursuivra à l'avenir en cas de remontée des cours du soja.

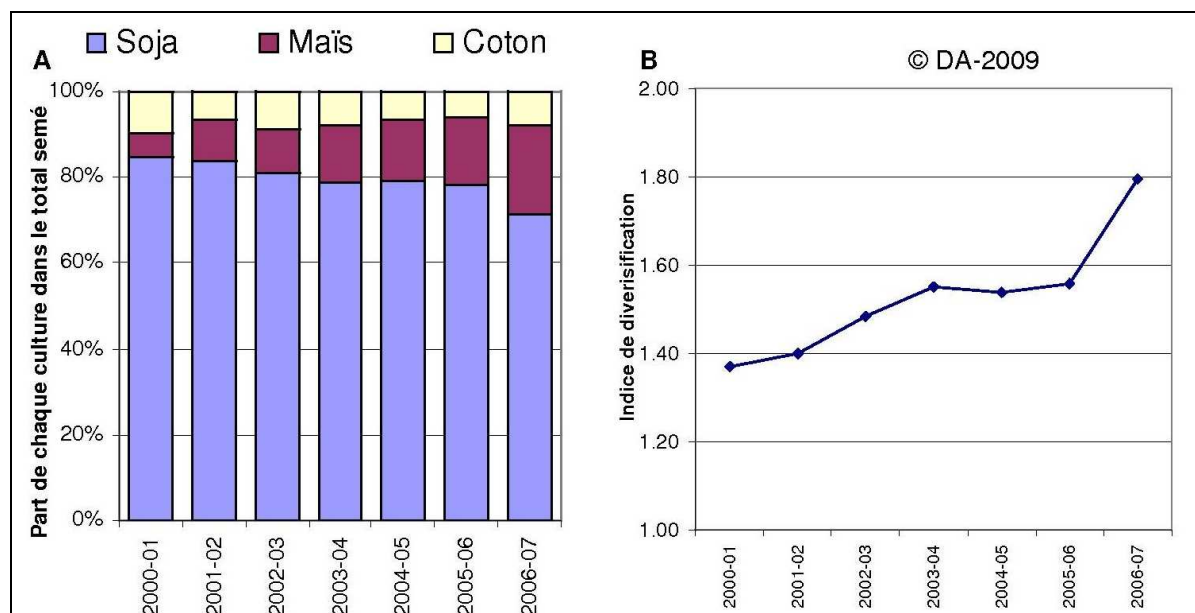


Figure 3.19 : Evolution de la diversification au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007 : (A) Part des cultures de soja, maïs, et coton dans le total des cultures semées ; (B) Evolution de l'indice de diversification au Mato Grosso.

Le processus de diversification enclenché au Mato Grosso depuis quelques années se base en fait sur l'adoption de nouvelles pratiques culturales et notamment sur les systèmes de production en double cultures commerciales. En 2000-2001, ces systèmes de production ne représentaient que 6% (243 644 ha) du total des surfaces cultivées contre 30% (1 680 331 ha) sept récoltes plus tard (fig. 3.20.A). Ainsi, l'expansion des surfaces semées en coton et en maïs ne s'est pas faite aux dépens des cultures du soja et de la végétation naturelle. L'exemple du coton est très évocateur à ce sujet (fig. 3.21). Alors que 97% (392 350 ha) de la production de coton était issue de parcelles uniquement semées en coton en 2000-2001, ce taux n'est plus que de 68% (314 638 ha) en 2005-2006 avant de remonter à 73% (416 338 ha) en 2006-2007. Cette légère remontée est due à la crise du soja qui a incité certains producteurs à ne semer qu'une culture de coton, sans récolte de soja au préalable. En 2006-2007, 27% (153 619 ha) de la production de coton est donc issue de parcelles semées en double cultures, le coton étant semé après la récolte de soja. Dans ce cas, 85% de l'augmentation des surfaces semées en coton entre 2000-2001 et 2006-2007 est expliqué par la croissance des semis de coton en succession du soja. Cela confirme donc le fait que la diversification de la production agricole au Mato Grosso est d'abord liée à l'adoption de nouvelles pratiques culturales et non à l'expansion des surfaces agricoles ou à un recul d'une culture au profit des autres.

Les systèmes de production en double cultures commerciales sont un vecteur de diversification, mais ce sont également un moyen de mieux protéger les sols et les eaux. Ils permettent de couvrir les sols durant toute l'année et de limiter l'érosion (même si il convient de préciser que cela peut aussi entraîner un épuisement des sols plus rapide et une augmentation de l'utilisation de produits chimiques). A ce titre, l'augmentation des surfaces semées en soja et couvertes d'une culture non commerciale (sorgho ou millet par exemple) traduisent également un effort des producteurs pour mieux prendre en compte l'environnement. Au Mato Grosso, la période d'étude témoigne d'un changement radical des pratiques dans ce domaine puisque le rapport entre les surfaces couvertes en permanence et

celles non couvertes s’est inversé (fig. 3.20.B). En 2000-2001, 65% (2 548 519 ha) des surfaces cultivées n’étaient couvertes que par une seule culture dans l’année et étaient donc vulnérables à l’érosion. A l’inverse, en 2006-2007, 62% (3461663 ha) des surfaces cultivées sont couvertes toute l’année. Le problème de l’érosion des sols a donc été pris au sérieux et les efforts réalisés ont permis de lutter efficacement contre ce problème. De plus, le fait de laisser une couverture végétale en permanence sur les sols permet de réaliser un semis direct du soja lors de la récolte suivante afin d’améliorer les rendements. L’adoption de systèmes de production favorisant une couverture permanente des sols peut donc être considérée comme un signal d’intensification écologique puisque cela permet de mieux préserver l’environnement tout en maintenant des niveaux élevés de production.

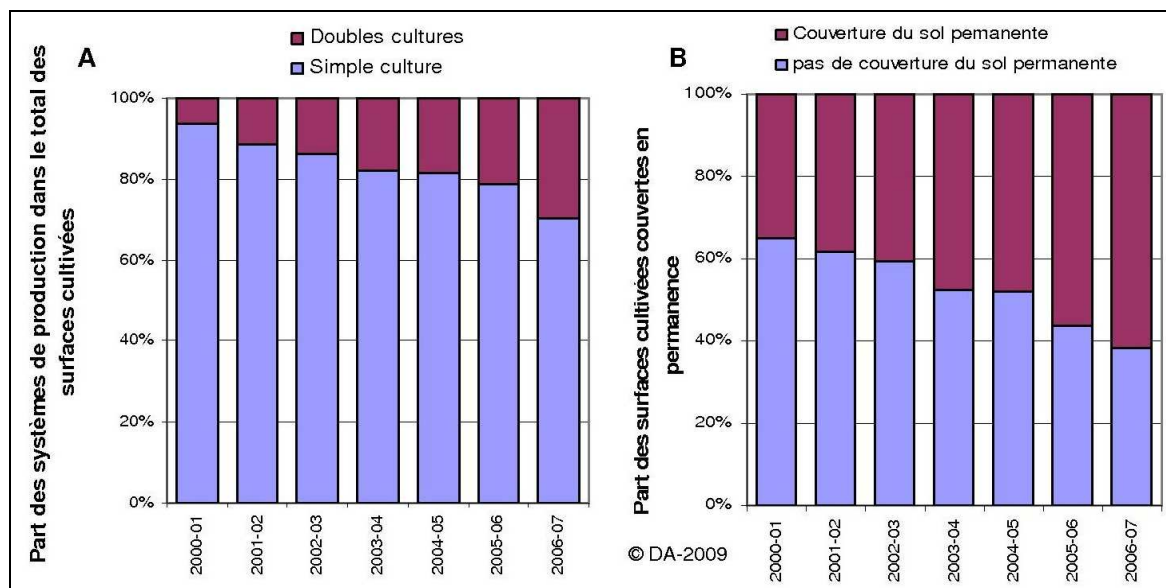


Figure 3.20 : Evolution de l’adoption de nouvelles pratiques culturales au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007 : (A) systèmes de production en simple ou double cultures commerciales et (B) couverture permanente des sols.

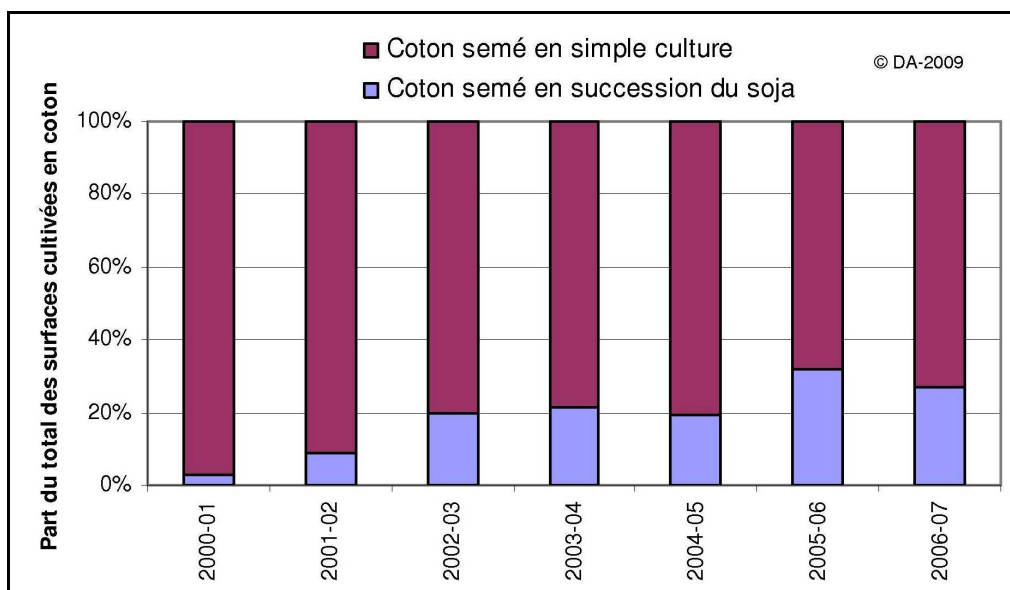


Figure 3.21 : Evolution des modes de production du coton au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.

4.2. Analyse à l'échelle locale

L'agriculture mato-grossense est donc en pleine phase de transition agricole mais celle-ci est soumise à de fortes variabilités régionales. Toutes les régions agricoles ne présentent pas les mêmes niveaux d'intensification et de diversification agricole. Il convient donc d'analyser ces variables à une échelle plus locale pour en comprendre la dynamique spatio-temporelle.

Les cartes agricoles issues des classifications des images MODIS TERRA/EVI permettent de localiser les régions de production des trois principales cultures commerciales (soja, maïs et coton) et les pratiques culturales adoptées (fig. 3.22 et 3.23). Le soja est cultivé dans les quatre régions agricoles repérées lors de l'étude du front économique (région centre, région de la Chapada dos Parecis, région sud-est et région est). Cette culture a connu une forte croissance des superficies cultivées (+1 675 300 hectares) au cours des sept années de la période d'étude (tableau 3.6). Cela a permis d'affirmer son rôle majeur dans le secteur agricole mato-grossense avec 5 200 913 hectares détectés lors de la récolte 2006-2007. La culture du maïs a aussi connu un fort essor (+557%, soit 1 294 194 ha) en étant semée en succession du soja. De la sorte, le maïs s'est répandu dans les mêmes zones que la culture du soja. Cette culture est donc surtout présente dans la région centre et dans une moindre mesure dans la Chapada dos Parecis et dans la région sud-est. Par contre, la région Est, dont l'intégration à l'espace agricole est de date plus récente, n'a pas encore adopté massivement cette culture.

La culture du coton est beaucoup moins répandue que le maïs (574 706 hectares en 2006-2007) (fig. 3.24) car elle nécessite des investissements lourds (machines agricoles, intrants...) contrairement à la culture du maïs qui est faite avec le même matériel que celui utilisé pour la culture du soja. Elle n'a donc connu qu'une hausse modérée des surfaces cultivées (+171 231 ha, soit+ 42%) au cours de la période d'étude. Elle se localise surtout dans la région sud-est, autour des communes de Campo Verde et Primavera do Leste, qui représentent 23% de la superficie cultivée en coton au Mato Grosso en 2006-2007 (132 000 hectares), et dans la Chapada dos Parecis. Dans cette dernière région, le coton s'est surtout développé au sein des grandes fazendas qui ont les moyens financiers pour diversifier leur production en investissant dans la culture du coton. Celles-ci ont favorisé le semis du coton en succession du soja (fig. 3.24.A) contrairement à la région sud-est où le coton est presque exclusivement semé en simple culture. La commune de Sapezal illustre bien ce changement puisque seulement 3,5% du coton y était semé en succession du soja en 2000-2001 contre 49% en 2006-2007. Les changements dans le mode de production du coton qui ont été observés à l'échelle du Mato Grosso (fig. 3.21) sont donc surtout liés aux changements opérés dans la Chapada dos Parecis. Dans une moindre mesure, les producteurs de la région centre commencent également à cultiver le coton après la récolte de soja (fig. 3.24.C).

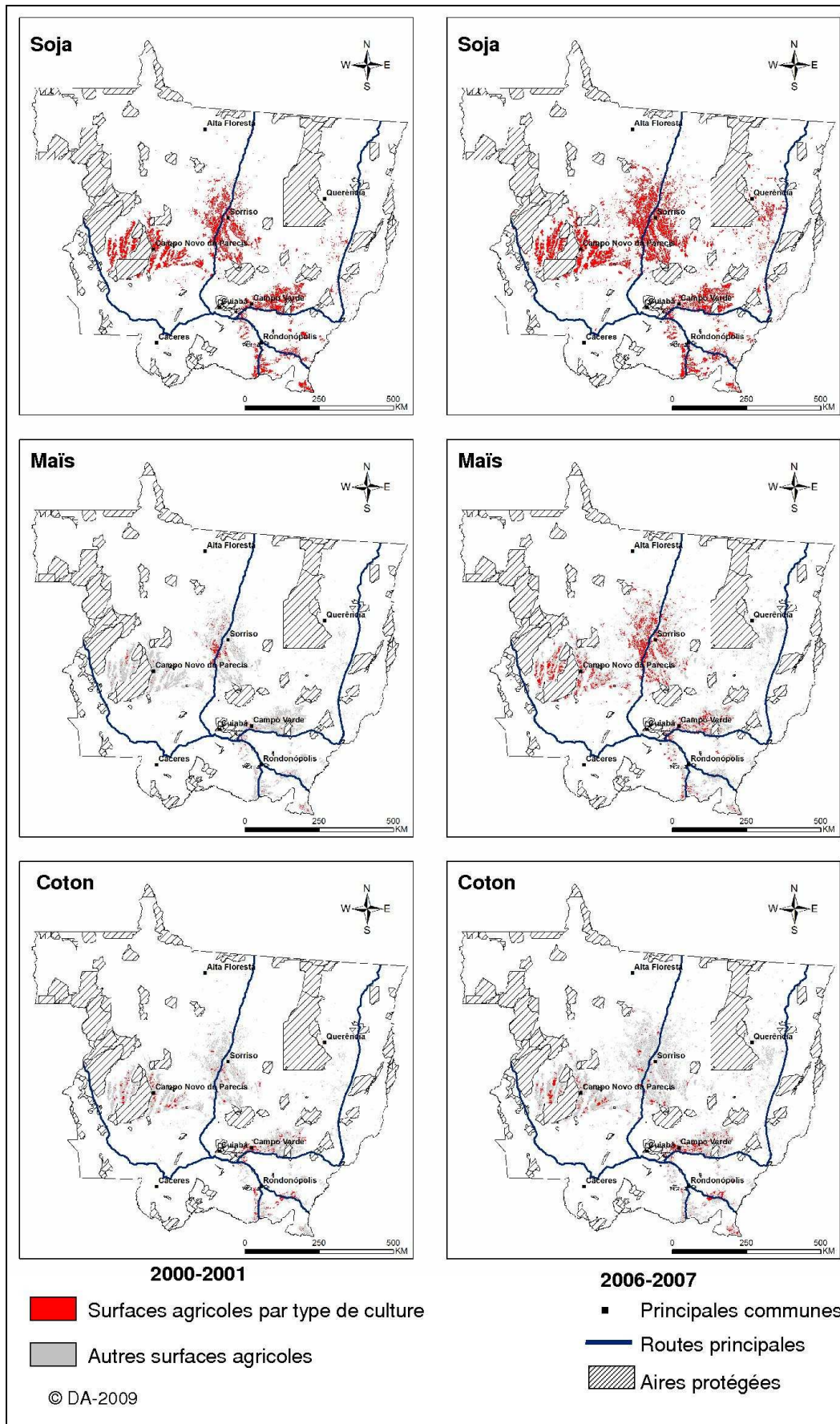


Figure 3.22 : Cartes des cultures de soja, maïs et coton au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.

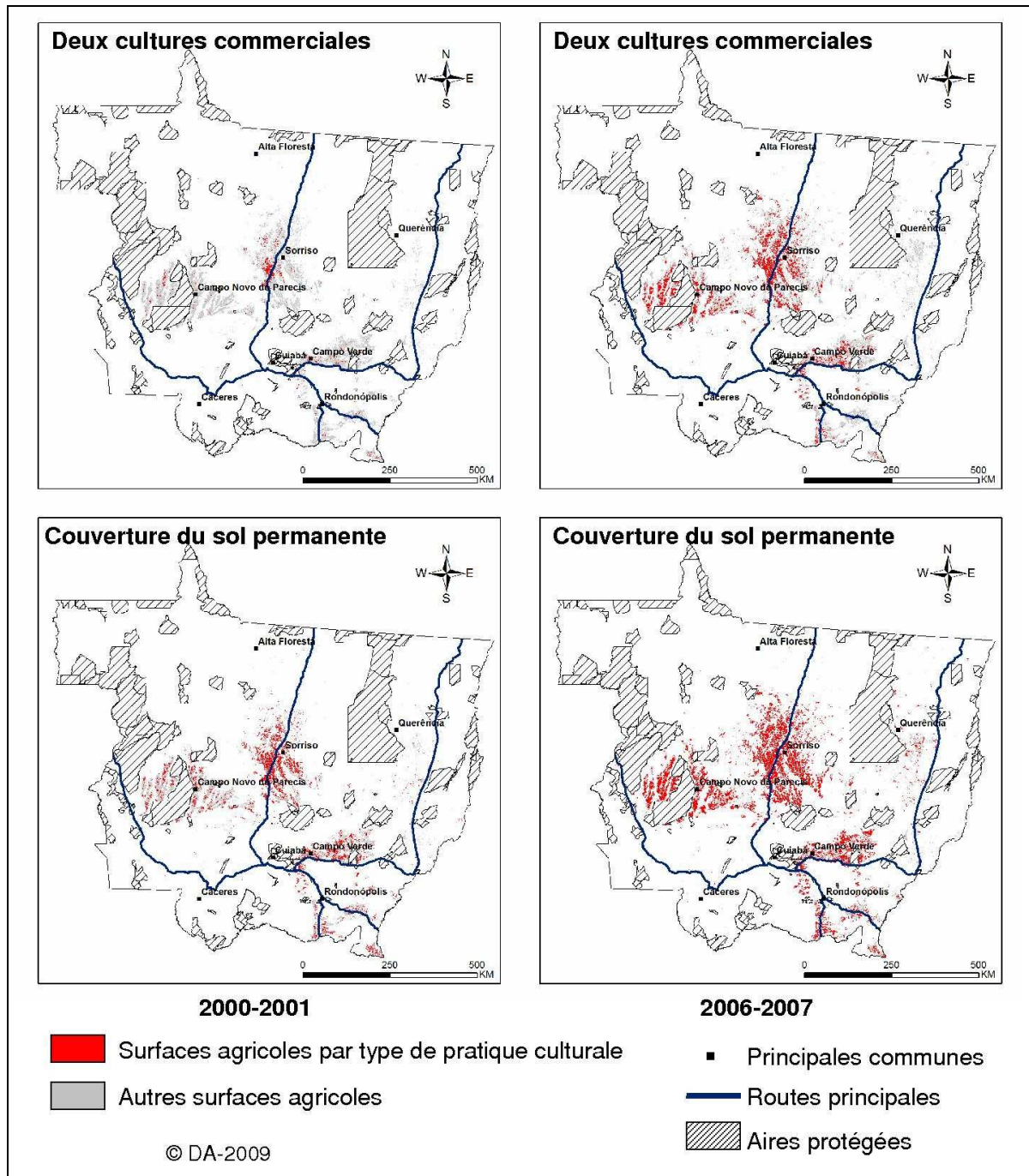


Figure 3.23 : Cartes des pratiques culturales adoptées au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.

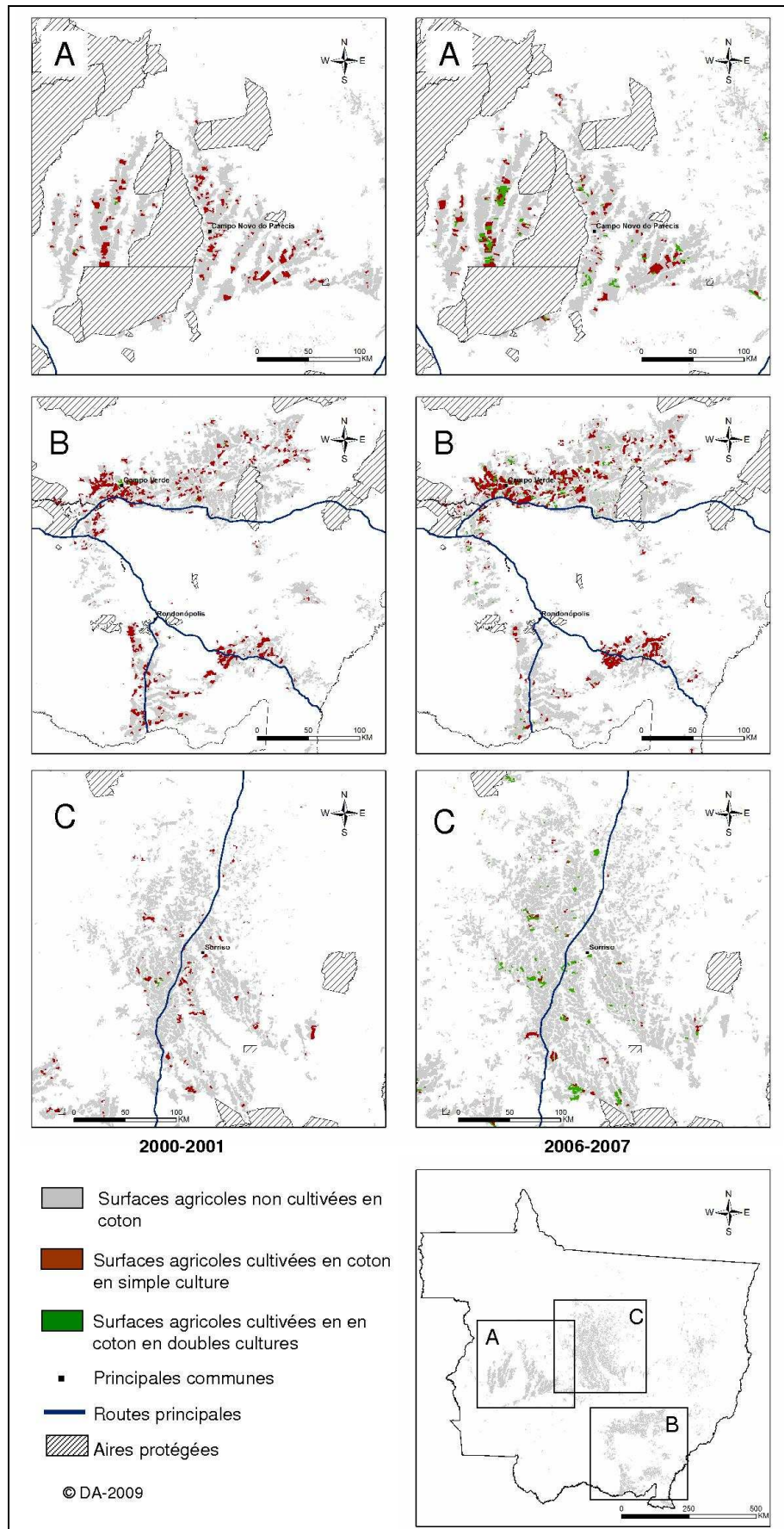


Figure 3.24 : Cartes des surfaces cultivées en coton en 2000-2001 et 2006-2007 en fonction des pratiques culturales adoptées pour les trois principales régions agricoles matogrossenses.

En raison de cette régionalisation des cultures et des pratiques culturelles, il existe une forte variabilité spatiale du niveau de diversification au Mato Grosso. La figure 3.25.A présente la dynamique spatio-temporelle de l'indice de diversification à l'échelle de la localité agraire (cellules de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$). En 2000-2001, seules les régions de Campo Verde et Lucas do Rio Verde-Sorriso présentaient des valeurs d'indice de diversification supérieures à 1,5. Cela indique que la monoculture prédominait largement au Mato Grosso à l'exception de quelques localités où une deuxième culture (de maïs à Lucas do Rio Verde et Sorriso ou de coton à Campo Verde) était semée comme appoint à la culture du soja. En 2006-2007, la diversification est plus importante. L'augmentation des semis de maïs en succession du soja a permis de réduire la monoculture dans toutes les régions agricoles de l'Etat à l'exception de la région est. A Campo Verde, qui avait déjà misé sur le coton en complément du soja, cela a même permis d'atteindre un niveau de diversification presque parfait, entre 2,5 et 3 (le maximum étant 3). Dans les autres « centres historiques » de l'agriculture mato-grossense tels que Sorriso et Sapezal, l'indice de diversification reste inférieur (entre 2 et 2,5) car la culture du coton est encore relativement marginale par rapport au soja et au maïs.

L'exemple de la culture du coton montre que le processus de diversification s'est accompagné de changements dans les pratiques culturelles qui sont également régionalisés. Les systèmes de production en double cultures commerciales se sont généralisés dans les régions centre, ouest et sud-est (fig. 3.25.B). En 2000-2001, il était courant de semer deux cultures commerciales (soja+maïs) dans les communes de Sorriso et Lucas do Rio Verde. Entre 25 et 50% des surfaces agricoles y étaient déjà cultivées de cette manière. Sept ans plus tard, cette technique s'est banalisée dans les trois plus grandes régions agricoles et elle s'est encore intensifiée à Lucas do Rio Verde où plus de 90% des surfaces sont cultivées de la sorte. Le constat est le même pour le taux de couverture permanent des sols (fig. 3.25.C). Les mêmes communes se trouvaient en avance par rapport aux autres régions agricoles au début de la période d'étude. A Lucas do Rio Verde, plus de 75% des surfaces agricoles étaient déjà couvertes en permanence (par une combinaison soja+maïs, soja+millet ou soja+sorgho) en 2000-2001. Dans les autres régions, ce taux oscillait entre 25 et 50%. En 2006-2007, cette pratique a été massivement adoptée dans toutes les régions agricoles avec plus de 50% des surfaces agricoles couvertes en permanence. Seule la région de Querencia reste encore un peu en retrait (entre 25 et 50% des surfaces). A Lucas do Rio Verde et Sorriso, le taux de couverture des sols dépasse aujourd'hui 90% et confirme le rôle moteur joué par ces communes dans la diffusion de nouvelles pratiques au Mato Grosso.

Trois facteurs peuvent aider à comprendre pourquoi ces communes adoptent plus rapidement les nouvelles pratiques culturelles :

- 1) un climat favorable avec une saison des pluies plus longue que dans les autres régions agricoles de l'Etat (cf. Partie 4 de cette thèse).
- 2) la présence d'instituts de recherche (Fundação Rio Verde à Lucas do Rio Verde et Fundação MT à Sorriso) qui sensibilisent les producteurs aux nouvelles techniques agricoles (cf. Partie 3- Chapitre 1).
- 3) la taille moyenne des fazendas. Par exemple, Lucas do Rio Verde est issu d'un projet *d'assentamento* mixte dont les lots initialement distribués étaient de 200 hectares (Nédélec, 2005). Malgré l'échec de ce projet suite à des difficultés financières à la fin des années 1980, la taille moyenne des fazendas y est aujourd'hui encore inférieure à

celle d'autres régions. Or, les fazendas plus petites ont une logistique plus simple que les grandes fazendas qui leur permet d'achever le semis du soja rapidement et donc de le récolter tôt (janvier-février) afin de semer du maïs en succession. Dans les grandes fazendas (notamment présentes sur la Chapada dos Parecis), le semis de soja peut aller jusqu'au mois de décembre et la récolte se fait alors trop tard pour pouvoir semer une culture à la suite.

- 4) le niveau d'éducation des producteurs. Grâce au succès amené par la culture du soja depuis les années 1980, les premiers colons ont souvent pu payer des études à leurs enfants, soit dans les nouvelles universités du front pionnier, soit à la capitale Cuiaba, soit dans les université du sud du Brésil ou de São Paulo. Le retour de cette nouvelle génération dans les communes de leurs parents amène une nouvelle sensibilité aux problèmes environnementaux à l'échelle communale. D'ailleurs, dans de nombreux cas, les enfants reprennent le contrôle des fazendas créées par leurs parents. Ils s'occupent alors de la gestion financière ou agricole des exploitations agricoles, apportant ainsi de nouvelles connaissances et compétences favorisant l'adoption de pratiques agricoles intensives. De même, dans les grandes fazendas non-familiales, les agronomes sont souvent jeunes et diplômés et donc plus enclins à pratiquer une agriculture intensive.

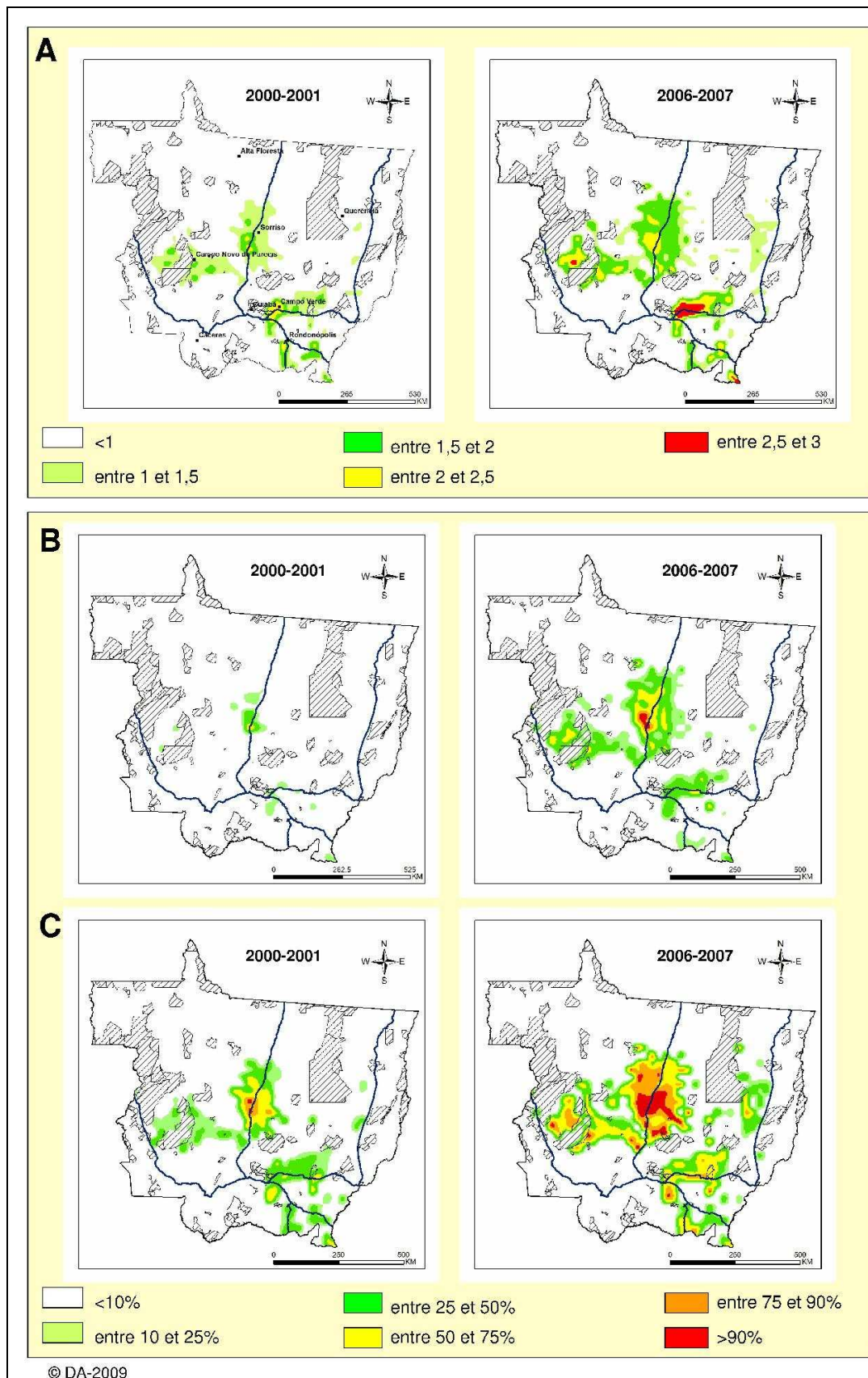


Figure 3.25 : Evolution de l'intensification agricole entre 2000-2001 et 2006-2007 : (A) Indice de diversification, (B) taux de double cultures commerciales (C) taux de couverture des sols permanente.

5. Conclusion

La figure 3.26 présente un aperçu simplifié de l'occupation du sol au Mato Grosso en 2007. A cette date, 39% de la superficie a été défrichée, soit 348 586 km²¹. En valeur relative, la déforestation est plus importante dans le *cerrado* qu'en forêt : 42% des *cerrados* ont été coupés contre 37% en forêt. Par contre, en valeur absolue, c'est la forêt qui est plus touchée (62% de la déforestation est localisée en région forestière). La déforestation massive dans cet Etat depuis les années 1990 s'organise le long des principaux axes routiers. Seules les aires protégées sont épargnées par les déboisements. Cela traduit l'importance du rôle joué par l'Etat, en tant qu'aménageur de l'espace, dans cette région comme dans toute l'Amazonie.

L'agriculture mécanisée occupe 55 952 km², soit 16% de l'espace déboisé. Elle est surtout présente dans le *cerrado* où elle représente 27% du territoire défriché (35865 km², soit 64% des surfaces agricoles). En forêt, les cultures ne représentent que 9% du total déboisé. Ce faible chiffre s'explique par l'arrivée récente de l'agriculture dans la région forestière. Ce taux est amené à augmenter en suivant l'avancée du front d'ouverture vers le nord. Toutefois, à l'inverse de ce dernier qui résulte d'une politique d'aménagement menée à l'échelle nationale, le front économique progresse en fonction des conditions économiques et naturelles (sols, relief, climat) à partir de quatre enclaves déboisées réparties sur le territoire mato-grossense.

Enfin, l'agriculture est de plus en plus pratiquée de manière intensive. Les résultats indiquent une forte tendance à la diversification qui est liée à l'adoption de systèmes de production en double cultures commerciales (de 6% à 30% des surfaces agricoles entre 2000-2001 et 2006-2007). Ce front d'intensification progresse rapidement à partir de « centres agricoles historiques » (Sorriso, Lucas do Rio Verde, Sapezal, Campo Novo do Parecis) qui sont au cœur des enclaves agricoles qui caractérisent le front économique.

¹ NB : ce chiffre ne prend pas en compte les régénérations de forêts.

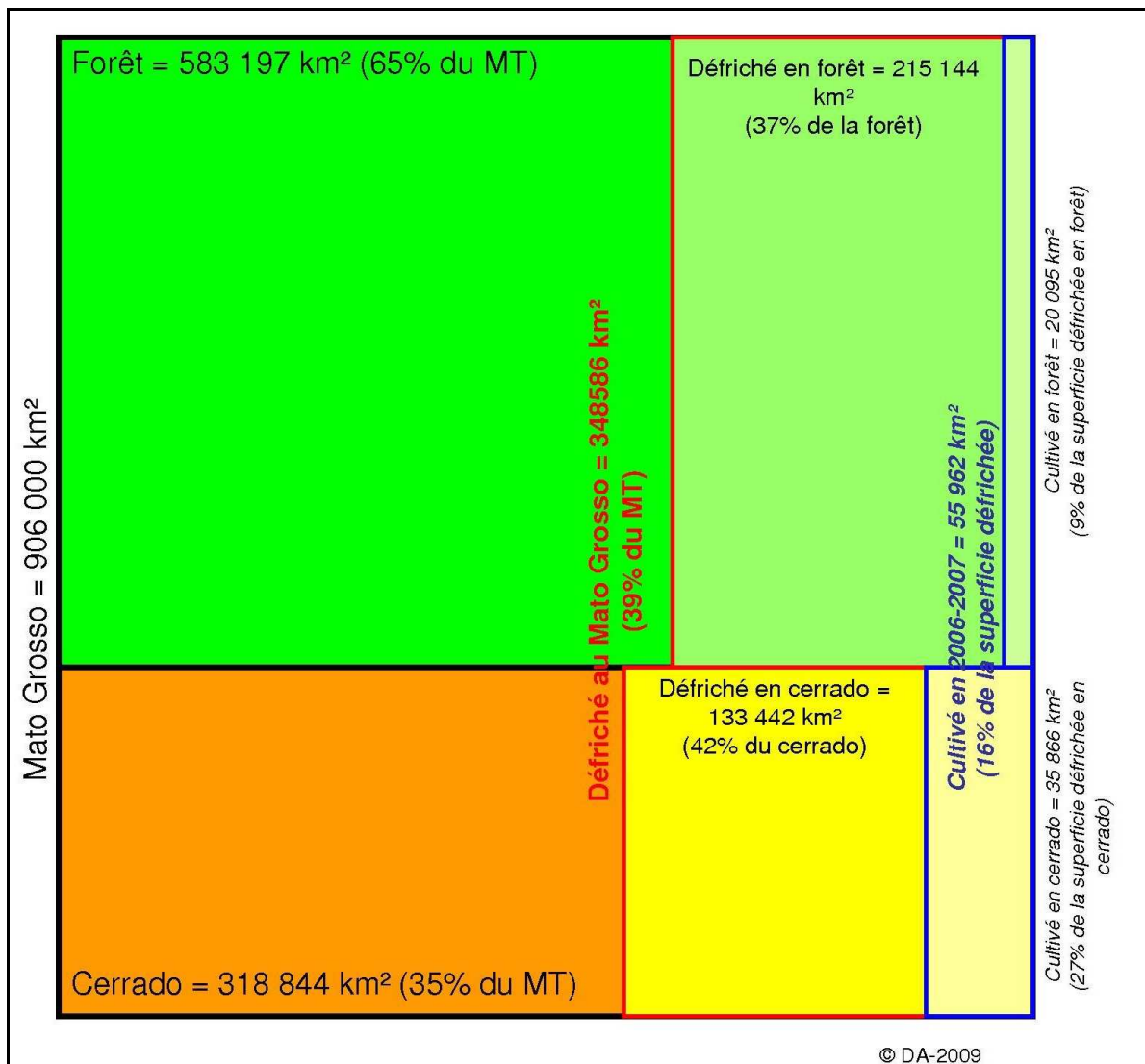


Figure 3.26 : Schéma de présentation de l'occupation du sol au Mato Grosso en 2007.

Chapitre 10. La dynamique du front pionnier

1. Introduction

Le chapitre précédent a permis de mettre en avant l'importance des changements d'occupation du sol au Mato Grosso depuis les années 1990. La déforestation s'est accentuée entre 1993 et 2007. Les surfaces cultivées ont fortement augmenté depuis 2000 et de nouvelles pratiques culturales ont massivement été adoptées par les producteurs. Le suivi de ces changements a permis l'observation de la progression des fronts d'ouverture, économique et d'intensification. Cependant, ces fronts ne progressent pas de manière indépendante et il convient donc d'évaluer leurs interrelations afin de comprendre l'avancée du front pionnier et la dynamique du soja au Mato Grosso.

Dans ce chapitre, nous cherchons à déterminer l'impact de l'expansion agricole sur la déforestation. Puis, nous déterminons comment le niveau d'intensification agricole influe sur l'expansion agricole, et donc indirectement sur la déforestation. Enfin, d'après le schéma de progression du front pionnier adopté de DeFries *et al.* (2004) (cf Partie 3-Chapitre 1), nous cartographions la progression du front pionnier.

2. Impact de l'expansion agricole sur la déforestation

L'agriculture mécanisée occupe 16% de l'espace déboisé au Mato Grosso, mais cela n'indique pas que la déforestation ait été réalisée à des fins agricoles. Pour considérer l'impact de l'avancée du soja, il faut alors prendre en compte le temps de conversion de la végétation naturelle en culture. Dans cette thèse, nous estimons que la conversion a été directe lorsque la mise en culture a été effectuée dans les deux ans suivant le déboisement¹. Au Mato Grosso, 12,6% des superficies défrichées entre 2001 et 2004 ont été converties en culture dans les deux années suivant le déboisement, ce qui représente tout de même 777 114 hectares (dont 495000 ha en région forestière). ***Cela répond donc au premier argument avancé par les producteurs (cf Partie 3 - Chapitre 1) : l'agriculture mécanisée n'est pas le principal facteur de déforestation en Amazonie matogrossense puisque seulement 12% des terres sont déboisées par les grands agriculteurs. Cependant, l'importance des superficies considérées fait que l'impact du soja sur la déforestation ne peut pas être pour autant négligé.***

Par ailleurs, les producteurs affirment que l'expansion agricole se produit sur des parcelles abandonnées ou vendues qui ont été défrichées à d'autres fins que l'agriculture (notamment l'élevage). Dans cette étude, il apparaît que 29% des parcelles nouvellement mises en cultures au Mato Grosso entre 2001 et 2006 l'ont été sur des parcelles déboisées dans les deux années précédentes (cela représente 924 295 ha). Ce chiffre connaît de fortes variations spatio-temporelles (fig. 3.27). Par exemple, en 2004, 34% des nouvelles cultures se trouvaient dans des parcelles récemment défrichées. Surtout, les conversions directes en cultures sont plus fréquentes en forêt où elles représentent 36% des nouvelles parcelles agricoles sur la période 2001-2006. Ce chiffre n'est que de 22% en *cerrado* car les terres déboisées y sont plus nombreuses du fait d'une occupation plus ancienne.

¹ Cette valeur est prise en compte car il faut généralement deux ans pour convertir une forêt en culture de soja. En effet, après le déboisement, une ou deux cultures de riz sont réalisées pour corriger les sols.

Ainsi, le second argument avancé par les défenseurs du soja (cf Partie 3 - Chapitre 1) est vérifié puisqu'une majeure partie (71%) de l'expansion agricole se fait sur des parcelles défrichées plus de deux ans avant la première mise en culture. Mais, ici encore, ce résultat est à nuancer étant donné les importantes superficies (supérieures à 900 000 ha) de végétation naturelle converties en cultures entre 2001 et 2006. De plus, les forêts sont particulièrement concernées par les conversions en culture puisque plus du tiers des surfaces nouvellement mises en culture le sont sur des parcelles défrichées dans les deux ans auparavant.

Ces résultats montrent toute la complexité de juger de l'impact de la dynamique du soja sur la déforestation au Mato Grosso. Les défenseurs de l'expansion agricole peuvent s'appuyer sur des chiffres qui parlent pour eux : une forte présence de l'agriculture dans le *cerrado*, un faible pourcentage de la déforestation est dû à l'agriculture mécanisée, la majorité de l'expansion agricole se produit sur des parcelles déboisées à d'autres fins que l'agriculture (notamment pour l'élevage). Mais les valeurs absolues observées et l'avancée de la frontière agricole vers la forêt restent alarmantes et confortent les dénonciateurs de l'expansion agricole.

Les six affirmations suivantes résument l'information issue de ces premiers résultats :

- 1) Au total, 16% des surfaces défrichées au Mato Grosso sont cultivées en 2006-2007.
- 2) L'agriculture mécanisée est installée à 64% dans la région de *cerrado*...
- 3) ... mais l'expansion agricole se fait aujourd'hui dans la région de forêt (68% des nouvelles mises en culture en 2006-2007).
- 4) 12% des superficies déboisées au Mato Grosso entre 2001 et 2004, soit 777 000 ha, ont été converties en cultures dans les deux années qui ont suivi la déforestation...
- 5) ... et ces conversions représentent 29% de l'expansion agricole (mais 36% en forêt) entre 2001 et 2006 (soit plus de 900 000 ha)...
- 6) ... donc 71% de l'expansion se produit par la conversion de parcelles qui ont été défrichées à d'autres fins que l'agriculture.

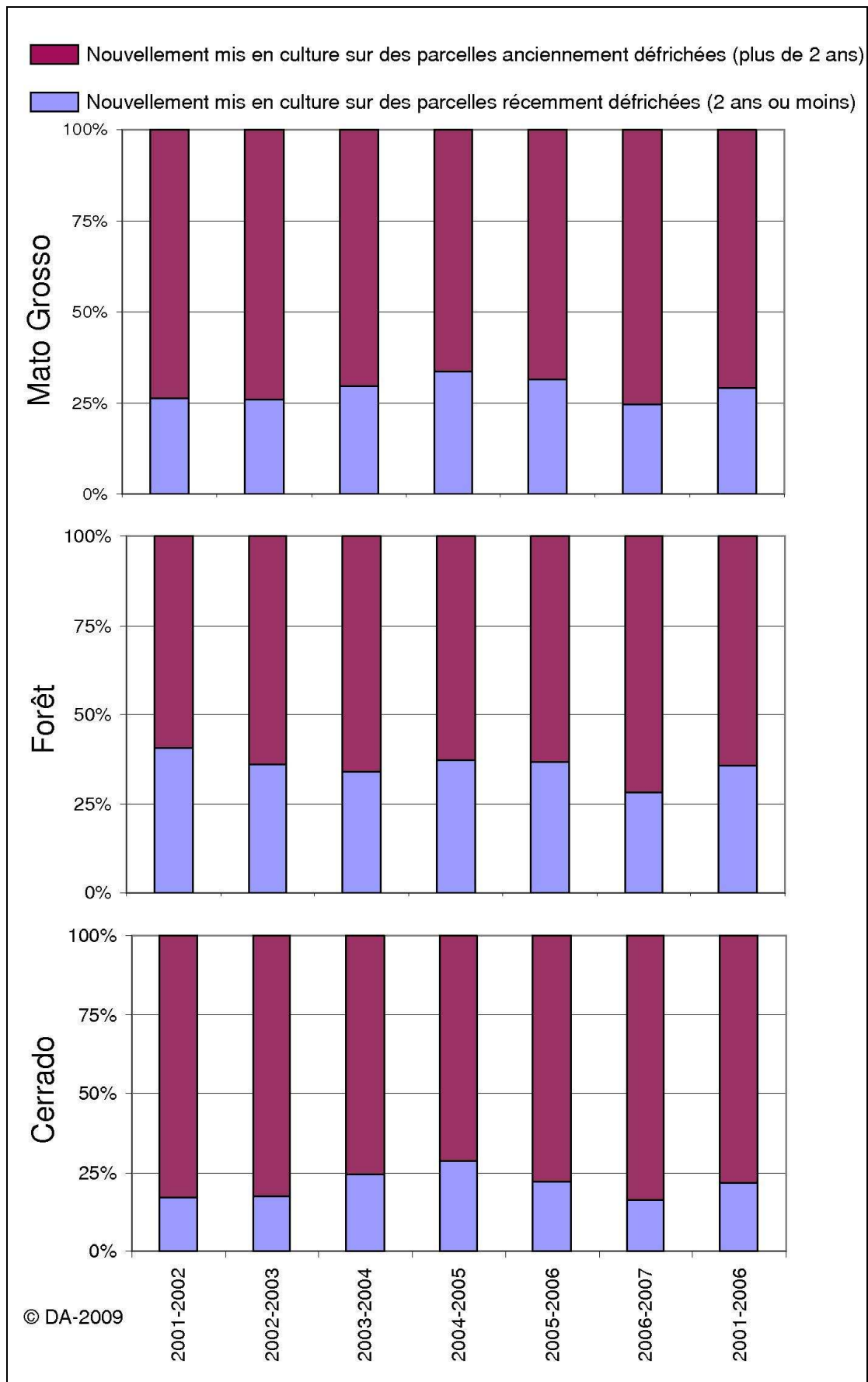


Figure 3.27 : Pourcentage des surfaces nouvellement mises en cultures (annuellement et sur la période d'étude) sur des parcelles anciennement défrichées ou récemment défrichées.

Ces chiffres cachent une forte variabilité régionale qui est mise en avant par les cartes de la figure 3.28. Les quatre régions agricoles étudiées au chapitre précédent présentent des dynamiques différentes.

A l'Est de l'Etat, la déforestation s'est répandue vers le nord, le long de la terre indigène du Xingu, témoignant de l'avancée du front d'ouverture. Les régions agricoles n'y sont pas encore consolidées puisqu'on ne remarque que quelques zones où l'agriculture représente plus de 50% des terres déboisées. Elles sont cependant en expansion : plus de 20% de l'espace a été converti en culture entre 2000 et 2006 dans une zone centrée sur Querencia. Or, cette zone correspond également à une zone de forte déforestation (plus de 20% de l'espace a été déboisé entre 2000 et 2006) (fig. 3.28.A), ce qui nous laisse supposer qu'il existe un lien fort entre ces deux variables. Cependant, la déforestation n'est pas majoritairement expliquée par l'agriculture. En effet, environ 90% de l'expansion agricole s'est produite en intégrant des parcelles anciennement déboisées à l'espace agricole (fig. 3.28.E) et la déforestation est destinée à l'expansion du soja dans moins de 50% des cas (fig. 3.28.D). On peut donc supposer que l'avancée du soja sur des terres anciennement défrichées est un facteur indirect de déforestation puisqu'elle pourrait expliquer la progression du front d'ouverture vers le nord, à l'est de la terre indigène du Xingu.

Au Sud-Est, on distingue une grande région agricole consolidée où les cultures occupent plus de 50% des terres ouvertes. Cette région est localisée au sein d'une mégaclearière où plus de 50% de l'espace a déjà été déboisé. Les taux de déforestation et d'expansion agricole au cours de la période d'étude sont faibles car la situation a peu évolué entre 2000 et 2006. (fig. 3.28.C). De plus, l'expansion agricole se fait à plus de 90% sur des parcelles anciennement déboisées et moins de 50% de la déforestation est expliquée par l'agriculture. On peut donc conclure que l'expansion du soja entre 2000 et 2006 dans cette région n'a pas (ou peu) entraîné de déforestation, même de façon indirecte. Cela est dû au fait que le Sud-Est du Mato Grosso a été colonisé plus tôt que les autres régions, suite à l'ouverture de la route BR-070. L'espace y est donc d'ores et déjà presque entièrement déboisé et l'expansion agricole ne peut s'y faire aujourd'hui que sur des parcelles anciennement défrichées. Cependant, ces cartes ne nous permettent pas de conclure si les personnes abandonnant ou vendant leurs parcelles dans ces régions migrent vers un autre front pionnier, plus au nord, auquel cas le lien indirect entre l'expansion agricole et la déforestation serait plus important qu'il n'y paraît.

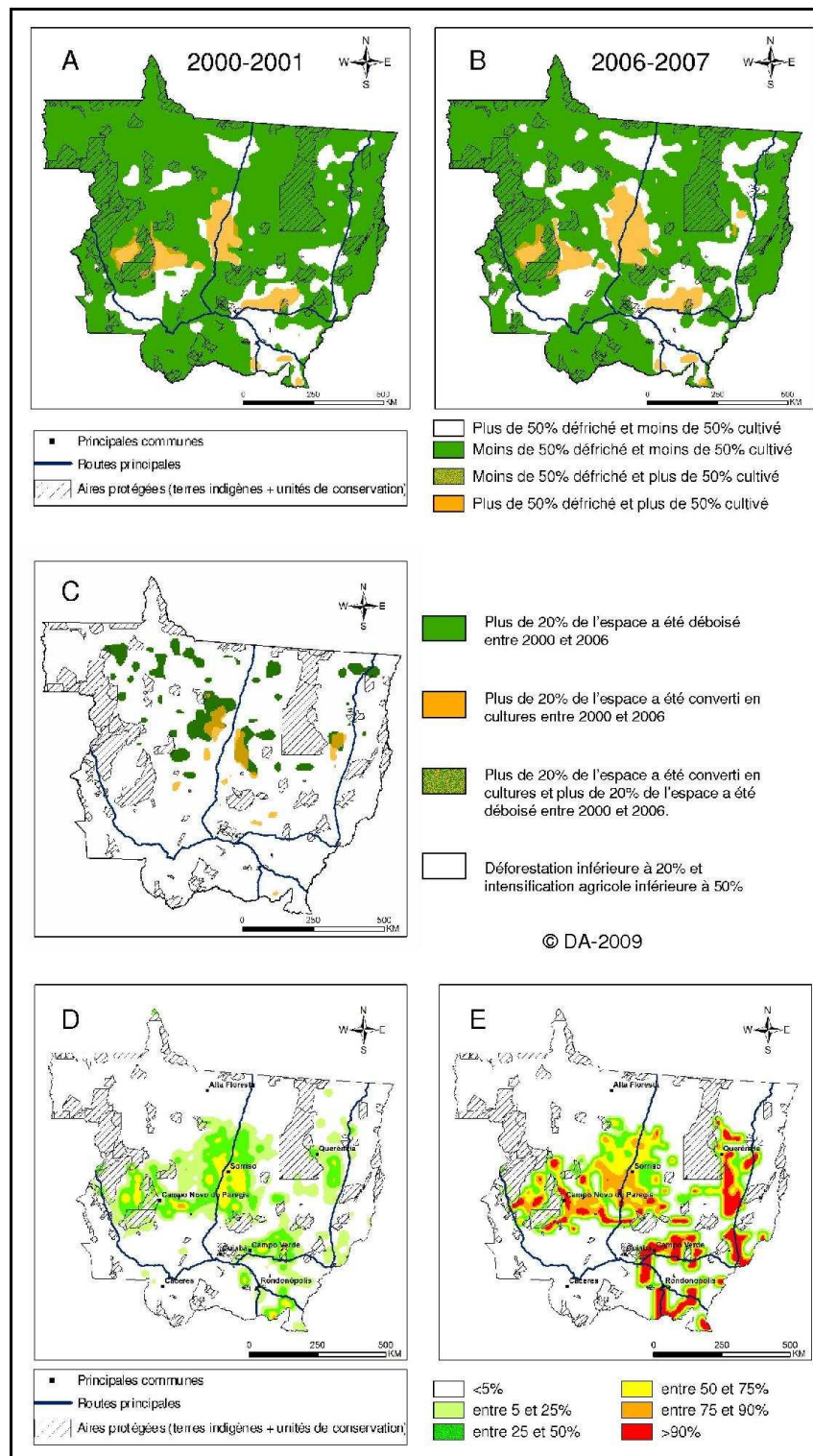


Figure 3.28 : Présentation du lien entre expansion agricole et déforestation : (A et B) Evolution comparée du front d'ouverture (à partir d'un seuil où plus de 50% de l'espace est déboisé) et du front économique (à partir d'un seuil où plus de 50% de l'espace déboisé est utilisé par l'agriculture) entre 2000-2001 et 2006-2007 ; (C) Comparaison des régions où la déforestation et l'expansion agricole ont été les plus intenses entre 2000 et 2006 ; (D) Pourcentage de la déforestation produite entre 2001 et 2006 ayant été convertie en cultures dans les deux ans suivant le déboisement ; (E) Pourcentage des surfaces agricoles nouvellement mises en culture entre 2001 et 2006 sur des parcelles défrichées il y a plus de deux ans.

Dans la région de la Chapada dos Parecis, la situation est à première vue comparable à celle observée au Sud-Est : l'expansion agricole et l'augmentation de la déforestation ont été modérées entre 2000 et 2006. L'expansion agricole s'effectue aussi majoritairement sur des parcelles anciennement défrichées mais les taux sont inférieurs à ceux observés à l'Est et au Sud-Est (plus de 50% des nouvelles mises en culture contre plus de 90% à l'Est et au Sud-Est) (fig. 3.28.D). Il existe donc une proportion plus importante de déforestation destinée à l'agriculture. Ce taux dépasse même les 50% à Sapezal par exemple (fig. 3.28.C). Mais, la déforestation y est limitée puisqu'elle est inférieure à 20% de l'espace à Sapezal et à Campo Novo do Parecis (fig. 3.28.A). Ainsi, bien que le lien direct entre expansion agricole et déforestation existe, il est atténué par les faibles superficies mises en jeu. Ici aussi, ces faibles valeurs s'expliquent par le fait que l'espace a déjà été largement déboisé par les grandes fazendas qui se sont installées dans la région dès les années 1970. Plus au nord (Brasnorte et ouest de Nova Maringa), la déforestation en avant de la région agricole est forte (fig. 3.28.C) (plus de 20% de l'espace a été déboisé entre 2000 et 2006) sans pour autant être convertie en cultures (entre 5 et 25% des surfaces déboisées converties en cultures) (fig. 3.28.D). Cela laisse supposer qu'il existe un lien indirect entre l'avancée de la frontière du soja et la déforestation en avant de celle-ci.

La région centre, située le long de la BR-163, est celle où le lien entre déforestation et expansion agricole est le plus fort. L'espace agricole consolidé (zones où plus de 50% de l'espace déboisé est cultivé) de la région de la BR-163 a quasiment doublé au cours de la période d'étude en s'étendant surtout vers l'est, l'ouest et le nord (fig. 3.28.A et 3.28.B). Ces zones de forte expansion agricole correspondent aux zones de forte déforestation. Dans ces régions, moins de 25% de l'expansion des cultures se fait sur des parcelles anciennement défrichées (fig. 3.28.E) et plus de 50% de la déforestation est destinée à l'agriculture (fig. 3.28.D). Ceci met en avant l'existence d'un lien direct entre ces deux phénomènes. Celui-ci est à la fois intense et étendu. En effet, l'avancée du soja explique directement entre 5 et 25% de la déforestation repérée dans un arc reliant les abords du Xingu, à l'Est, à la région de la Chapada dos Parecis, à l'Ouest (fig. 3.28.C). L'aire d'influence de cette région est donc grande. Cependant, ces pourcentages indiquent aussi que plus de 75% de la forte déforestation qui y est observée n'est pas destinée à l'agriculture. Il existe donc également un lien indirect entre l'expansion agricole et la déforestation puisque les déboisements à des fins non agricoles progressent en avant des zones agricoles non consolidées. La figure 3.28.C indique en effet que les zones de forte déforestation sont plus grandes que les zones de forte expansion agricole ce qui témoigne d'une avancée plus rapide de la déforestation que du soja. La figure 3.28.B représente bien cette situation en montrant une « enveloppe » (en blanc sur la carte) autour de la région agricole consolidée en 2006-2007 qui correspond à une zone où la déforestation a été intense mais où l'agriculture n'est pas encore le mode d'occupation prédominant. La présence de cette zone « tampon » traduit l'existence d'un lien indirect entre l'avancée de la frontière agricole et la progression du front de déforestation.

Ce lien indirect est plus intense dans la région de la BR-163 que celui observé au nord de la Chapada dos Parecis. En effet, même si la déforestation en avant de la région agricole consolidée de la Chapada dos Parecis a été importante (à Brasnorte et à Nova Maringa par exemple), la forêt occupe encore plus de 50% de l'espace (fig. 3.28.B). Cette différence régionale est confirmée par la figure 3.29 qui présente l'évolution de la déforestation à des fins non agricoles dans une zone de taille variable (entre 14 à 300 kilomètres de rayon) en fonction du niveau d'expansion agricole observé au centre de cette zone. Dans la région de la BR-163, un degré d'expansion agricole élevé augmente significativement la déforestation

dans un rayon de plus de 150 kilomètres. A l'inverse, dans la Chapada dos Parecis, le niveau d'expansion agricole n'affecte pas significativement le taux de déforestation à des fins non agricoles dans les alentours. Cela souligne donc que l'expansion agricole dans la région de la BR-163 a un impact indirect plus important sur la déforestation que dans la région de la Chapada dos Parecis. En conséquence, la zone de forte déforestation observée au nord de la Chapada dos Parecis pourrait être autant, voire plus, liée à l'expansion agricole dans la région de la BR-163 que dans la Chapada dos Parecis. Cependant, cette hypothèse devrait être vérifiée à partir d'enquêtes de terrain. Par exemple, trois producteurs rencontrés à Sorriso et à Lucas do Rio Verde ont confirmé qu'ils avaient acquis des fazendas à Nova Maringa.

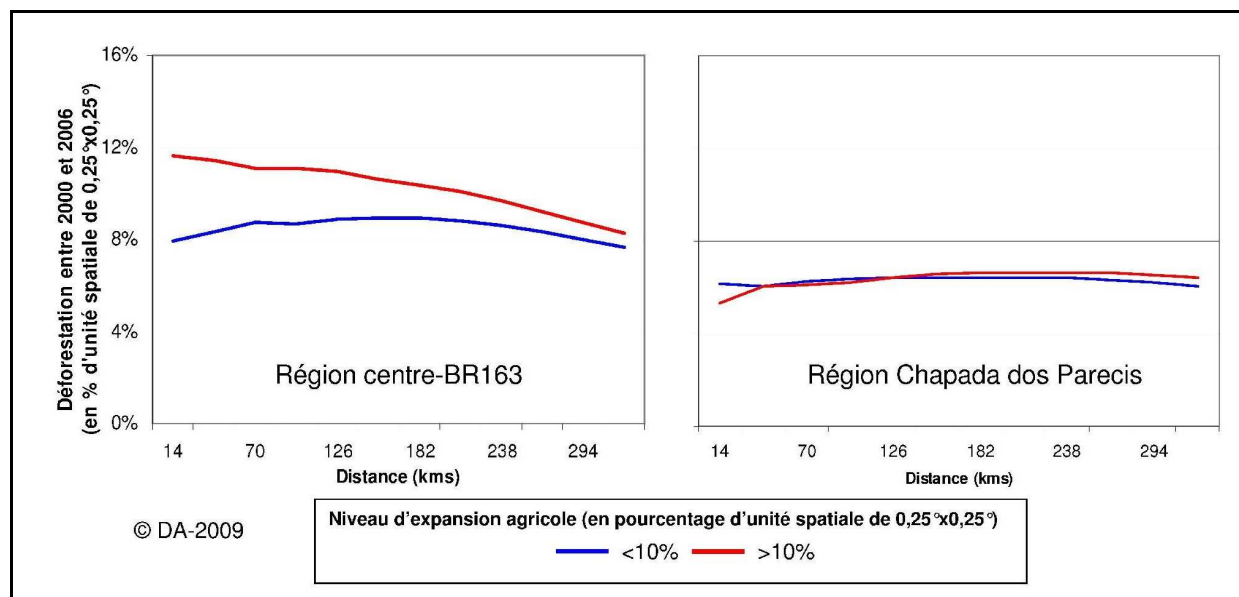


Figure 3.29. Evolution de la déforestation à des fins non agricoles entre 2000 et 2006 en fonction du niveau d'expansion agricole entre 2000-2001 et 2006-2007 dans une unité spatiale (0,25°x 0,25°) et de la distance par rapport à cette unité spatiale.

3. Expansion et intensification agricole : deux processus interdépendants

L'intensification agricole basée sur l'adoption d'un système de production en double cultures commerciales est surtout présente dans la région de la BR163 et, dans une moindre mesure, dans la Chapada dos Parecis (fig. 3.30). A l'Est et au Sud-Est, cette pratique culturale est moins répandue et il est donc difficile de mesurer son impact sur l'expansion des surfaces cultivées. Dans la région de la Chapada dos Parecis, à l'ouest, l'intensification agricole est élevée mais l'expansion agricole est modérée. Ceci est dû au fait que l'expansion est freinée par la présence de terres indigènes protégées. De plus, elle est surtout basée sur l'incorporation de terres anciennement défrichées (fig. 3.28.E) qui représentent une superficie relativement petite car la région est entièrement vouée à l'agriculture depuis de nombreuses années. A l'Est, l'expansion des cultures est importante même si elle s'est aussi effectuée sur des parcelles anciennement déboisées. La différence est que cette région a été récemment incorporée à l'espace agricole donc l'intensification n'a pas encore pu s'y développer.

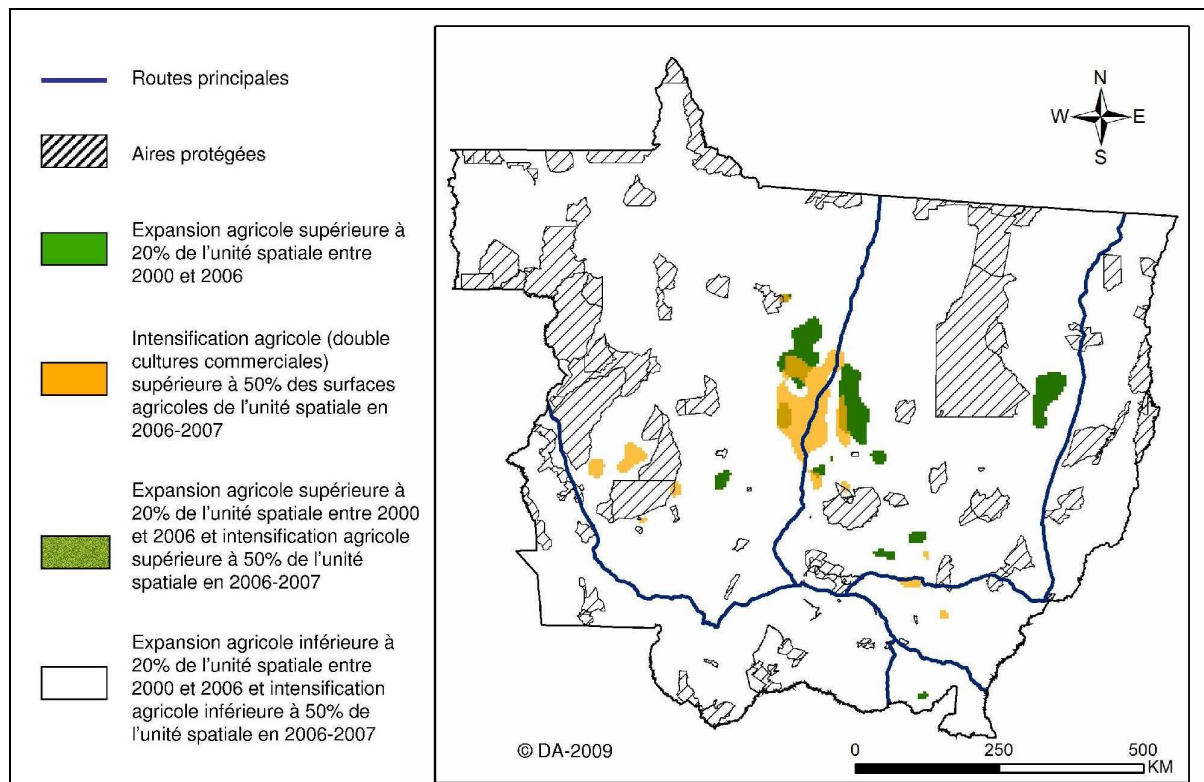


Figure 3.30 : Mise en relation des régions agricoles intensifiées et des zones d'expansion agricole intense entre 2000 et 2006.

La région centre, le long de la BR-163, est la région où l'agriculture est la plus intensive en 2006-2007 (plus de 50% des surfaces cultivées sont en système de production en double cultures commerciales) et où l'expansion agricole est la plus importante (plus de 20% de l'espace a été converti en cultures). Dans certaines régions, les surfaces agricoles ont fortement augmenté et se retrouvent rapidement cultivées en double cultures commerciales. Cela témoigne de changements d'occupation du sol rapides où des espaces de forêt se retrouvent cultivés de manière intensive en moins de sept ans. Toutefois, la majorité de l'expansion agricole se situe en périphérie des régions agricoles intensives. La figure 3.31 montre ainsi que le niveau d'intensification dans des régions agricoles consolidées (où plus de 50% de la superficie est cultivée) est corrélé avec le degré d'expansion agricole dans les alentours. Cette dernière est modérée lorsque l'intensification agricole est faible, se limitant à un rayon d'une quarantaine de kilomètres autour de la zone consolidée. Au contraire, si l'intensification agricole est élevée (plus de 75% des parcelles cultivées en double cultures commerciales par exemple), l'expansion des cultures est forte jusqu'à 150 kilomètres aux alentours. Le rôle moteur joué par l'adoption de pratiques culturales sur l'expansion des surfaces cultivées est donc démontré.

Pourtant, l'objectif de la « Révolution Verte » et de l'intensification agricole est de maintenir des niveaux de production élevés tout en limitant l'expansion agricole. A l'évidence, cela ne se vérifie pas au Mato Grosso puisque l'intensification agricole peut être considérée comme un vecteur d'expansion agricole. Néanmoins, la production agricole dans cet Etat a fait bien plus que se maintenir à des niveaux élevés. En effet, pour produire l'équivalent de la production récoltée en 2007 (23,6 millions de tonnes, dont 15,2 millions de tonnes de soja, 6,1 millions de tonnes de maïs et 2,2 millions de tonnes de coton) avec un système de production en simple culture, il aurait fallu cultiver 7,3 millions d'hectares. Or, les classifications des images MODIS ne détectent que 5,6 millions d'hectares cultivés en 2006-2007.

L'intensification agricole, i.e. l'adoption des systèmes de production en double cultures, a donc permis de sauver 1,68 millions d'hectares de forêt ou de *cerrado*. En conséquence, l'intensification agricole joue un rôle ambigu sur la dynamique spatiale des cultures : c'est à la fois un moteur et un frein de l'expansion agricole. Il convient alors d'évaluer si le rapport de force entre ces deux relations est soumis à une variabilité spatiale. Dans certaines régions, les producteurs assurent l'augmentation de la production par l'augmentation des surfaces cultivées tandis que, dans d'autres régions, ils misent davantage sur l'adoption de nouvelles pratiques culturales. Pour cela, on détermine la part de l'augmentation de la production qui est due à l'adoption de systèmes de production en double cultures, i.e. à l'intensification agricole (cf. la méthode présentée en Partie 3- Chapitre 1).

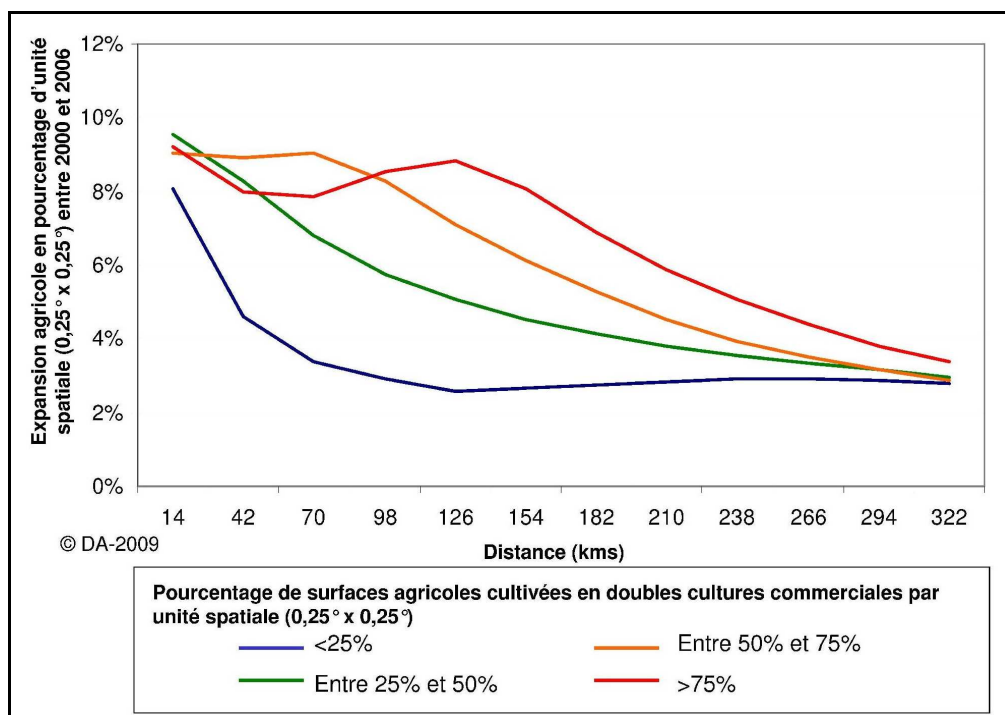


Figure 3.31 : Evolution de l'expansion agricole entre 2000-2001 et 2006-2007 en fonction du niveau d'intensification agricole dans une unité spatiale (0,25° x 0,25°) et de la distance par rapport à cette unité spatiale.

A l'échelle du Mato Grosso, 46% de l'augmentation de la production est due à une intensification agricole. Ainsi, l'expansion agricole est encore aujourd'hui le moyen privilégié pour augmenter la production. Cependant le rapport entre intensification et expansion agricole s'équilibre ce qui démontre que la filière agricole matogrossense passe dans une nouvelle phase de développement. A l'échelle locale, la carte de la figure 3.32 présente le rôle leader joué par les centres « historiques » dans ce processus de verticalisation de la production agricole. Les seules communes dont l'augmentation de la production agricole est expliquée à plus de 50% par l'intensification agricole sont Lucas do Rio Verde, Sorriso, Nova Mutum, au centre, Campo Verde et Primavera do Leste au Sud-Est et dans une moindre mesure Sapezal dans la Chapada dos Parecis. A l'Est, les systèmes de production en double cultures sont presque inexistantes et l'augmentation de la production est donc expliquée à plus de 90% par l'expansion agricole. Ces différences régionales s'expliquent par des stades d'avancement décalés dans la transition agricole.

Ainsi, les régions où l'expansion agricole prédomine sont logiquement les zones les plus tardivement incorporées à l'espace agricole, i.e. les périphéries des

« centres historiques » consolidés. Cependant, on remarque que l'intensification agricole s'étend en avant de cette zone de consolidation agricole (ligne noire sur la carte). Par exemple, l'intensification explique déjà entre 25 et 50% de l'augmentation des surfaces semées dans certaines localités à l'Ouest de la région centrale consolidée. Cela signifie que les premiers processus de diversification et d'intensification sont déjà enclenchés alors que la conquête de nouvelles terres n'est pas encore achevée, illustrant ainsi l'esprit entreprenant des producteurs qui habitent le front pionnier. Les dynamiques d'expansion et d'intensification ne sont donc pas exclusives. Elles sont complémentaires sur un même espace, ce qui veut dire que les fronts économiques et d'intensification se succèdent de manière très rapprochée dans cette région.

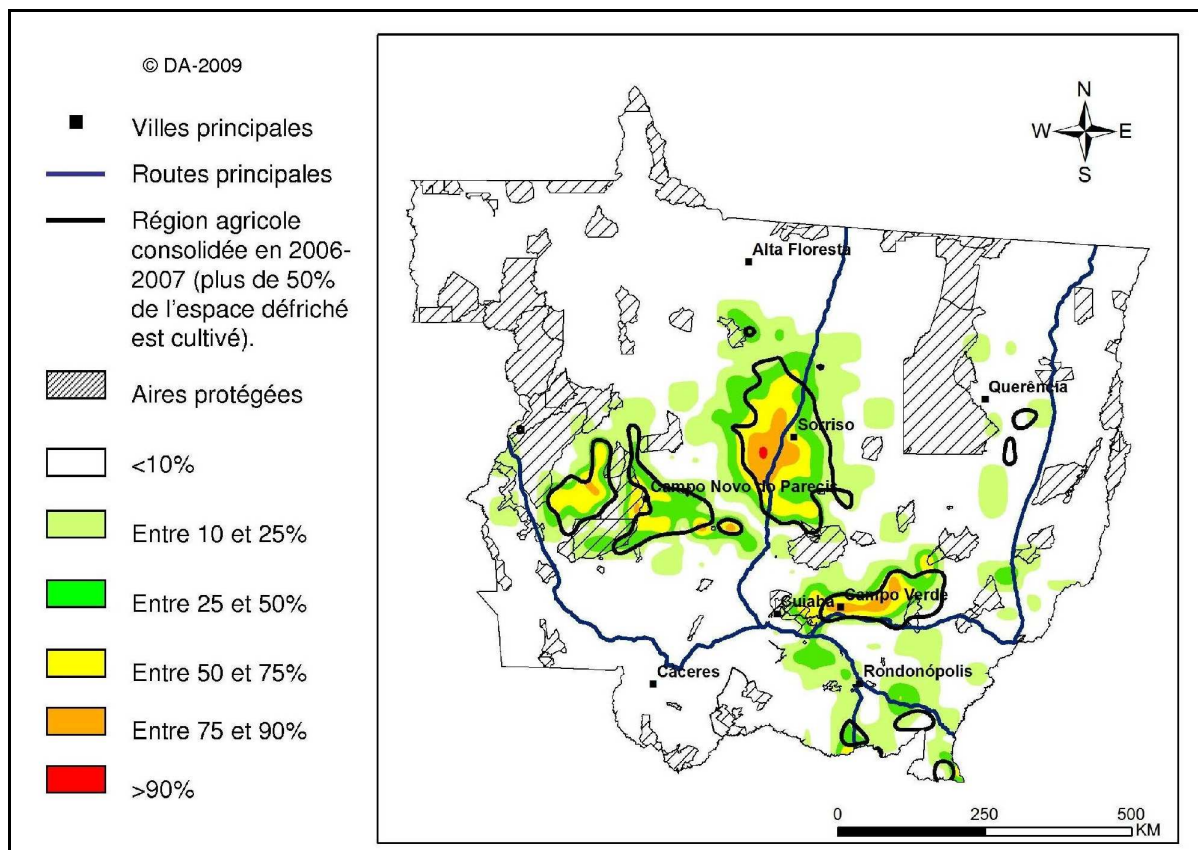


Figure 3.32 : Part de l'augmentation des surfaces semées entre 2000-2001 et 2006-2007 expliquée par l'adoption des systèmes de production en double cultures commerciales.

4. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation

L'intensification agricole est un moteur de l'expansion agricole, laquelle explique en partie la déforestation. On peut donc émettre l'hypothèse qu'il existe un lien indirect entre le front d'intensification agricole et le front d'ouverture.

La carte de la figure 3.33 représente les régions agricoles intensives (où plus de 50% des surfaces agricoles sont cultivées en double cultures commerciales) et les régions où la déforestation est la plus intense (où plus de 20% de l'espace a été déboisé entre 2000 et 2006). Il apparaît clairement que les zones où la déforestation a été la plus intense se situent en avant des zones d'intensification agricole. Comme attendu, il n'existe donc pas de lien direct entre l'intensification et la déforestation car les régions d'intensification ne correspondent pas aux

régions de forte déforestation. Par contre, il existe un lien indirect dans la région de la BR-163 où l'intensification agricole entraîne une accélération de l'expansion agricole, laquelle explique directement et indirectement les forts taux de déforestation qui y sont observés.

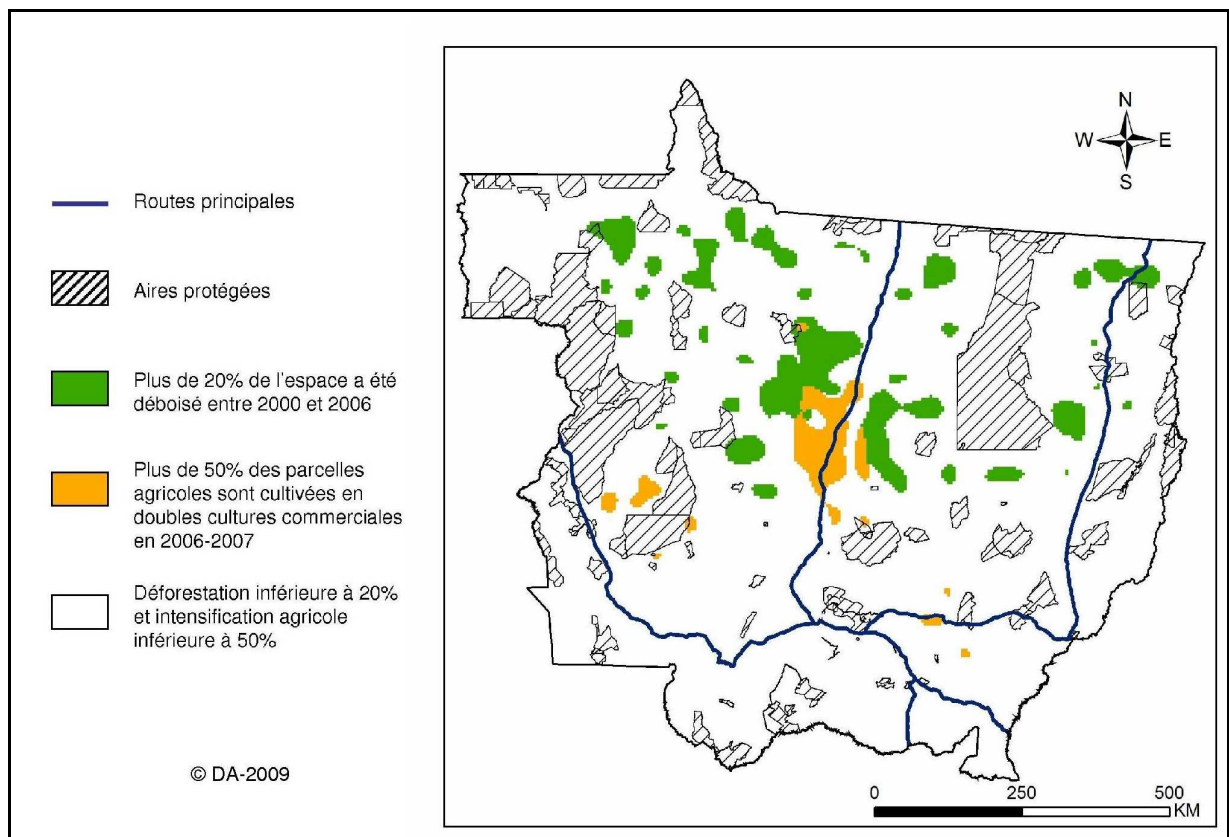


Figure 3.33 : Mise en relation des régions agricoles intensifiées et des zones de déforestation intenses entre 2000 et 2006.

Par conséquent, alors que le niveau d'expansion agricole dans un espace donné explique les taux de déforestation dans les espaces voisins, le niveau d'intensification agricole explique la déforestation dans les espaces distants. La figure 3.34 présente ainsi l'évolution de la déforestation, autour de localités agricoles du Mato Grosso dont plus de 50% de la surface est cultivée, en fonction du niveau d'intensification agricole. Les taux de déforestation dans les localités étudiées sont faibles car une grande proportion de l'espace a déjà été défrichée. Par contre, ce taux de déforestation augmente au fur et à mesure que la région avoisinante considérée incorpore les zones d'expansion agricole et d'avancée de la frontière économique. Ici, le front de déforestation se situe donc à plus de 100 kilomètres des territoires où prédomine l'agriculture. Mais ce qui apparaît surtout est que le taux de déforestation observé sur le front est dépendant du niveau d'intensification agricole mesuré dans les régions consolidées. En effet, plus le système de production en double cultures commerciales est adopté dans une localité, plus la déforestation est intense à plus de 100 kilomètres de là. Au contraire, dans les régions agricoles où la production n'est pas intensive (taux de pratique des double cultures commerciales inférieur à 25%), le taux de déforestation reste faible et presque constant dans les alentours.

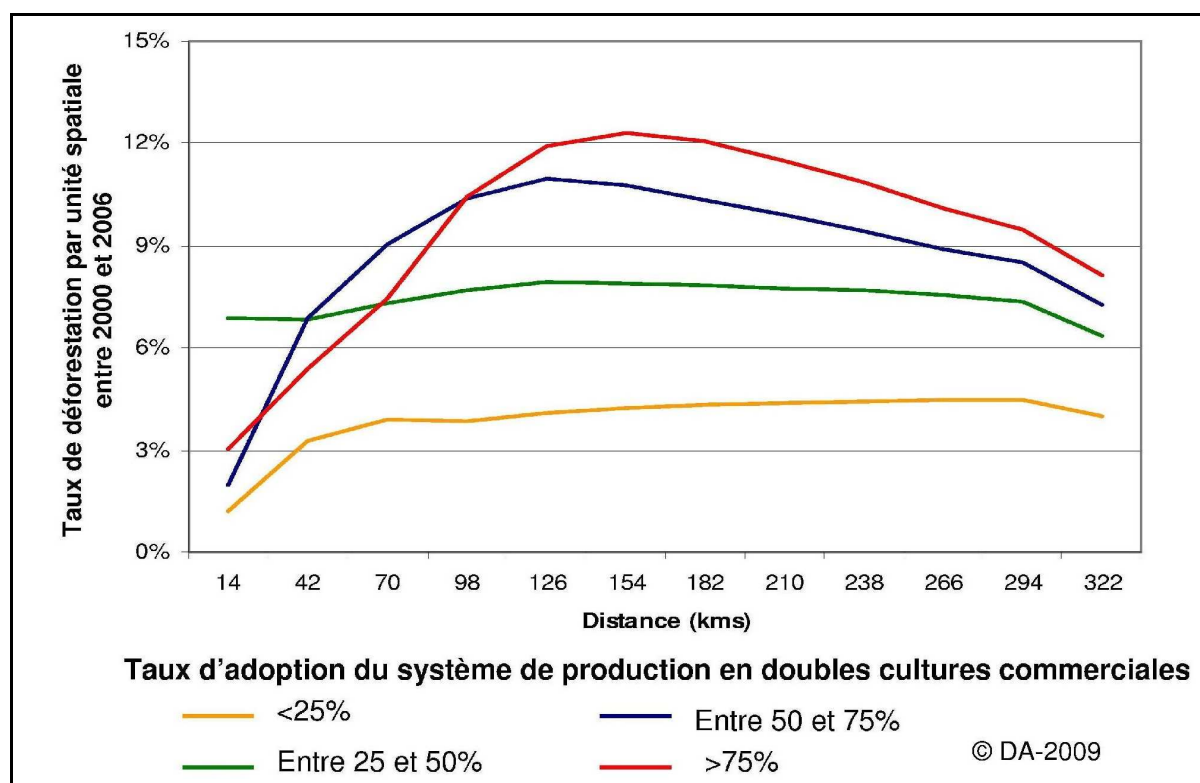


Figure 3.34 : Evolution de la déforestation en fonction du niveau d'intensification agricole.

5. Cartographie du front pionnier matogrossense

La méthodologie proposée au chapitre 1 pour cartographier le front pionnier est appliquée. Sept cartes de huit classes représentent les différents stades de la progression du front pionnier au Mato Grosso entre 2000 et 2006. Seules les cartes des années 2000-2001 et 2006-2007 sont présentées en figure 3.35. De plus, des exemples d'évolution de l'occupation du sol pour six localités agraires (fig. 3.36) et des profils spatiaux (fig. 3.37) illustrent les différents stades de progression du front pionnier et les différences régionales observées.

D'après les cartes de la figure 3.35, il ne reste guère plus que les réserves protégées et le Pantanal, au Sud, qui sont au stade de pré-colonisation, avec plus de 90% de végétation naturelle préservée. Certaines régions du nord-ouest sont aussi épargnées par la déforestation même si la situation s'est dégradée au cours de la période d'étude. Cela confirme donc l'efficacité des aires protégées, qu'elles soient habitées ou non par des populations traditionnelles, pour la conservation des couverts végétaux. Elles constituent le rempart le plus efficace pour lutter contre l'avancée du front pionnier et on peut donc espérer que ces zones n'atteignent jamais le stade suivant de la dynamique du front pionnier, i.e. l'occupation.

Une majeure partie de l'Etat se trouve aujourd'hui à un stade d'occupation non agricole (fig. 3.35), ce qui traduit le fait que le Mato Grosso est un Etat récemment colonisé, en cours d'intégration à l'espace national. Cependant, entre 2000 et 2006, de nombreux espaces sont passés du stade d'occupation au stade de consolidation (fig. 3.35). La déforestation se poursuit donc et atteint plus de 50% de l'espace dans de nombreuses localités de l'Etat. Ces régions forment des méga-clairières, déjà présentées au chapitre précédent, à partir desquelles s'organise la colonisation du Mato Grosso. On distingue surtout deux grandes régions au sud-est et au sud-ouest qui ont peu évolué au cours de la période d'étude.

Ce sont les régions d'occupation plus ancienne dans le biome de *cerrado*. Plus au nord, l'occupation du territoire se poursuit activement comme l'indique la forte expansion des espaces consolidés, surtout autour des régions de Sorriso, Alta Floresta, Juina et Querencia.

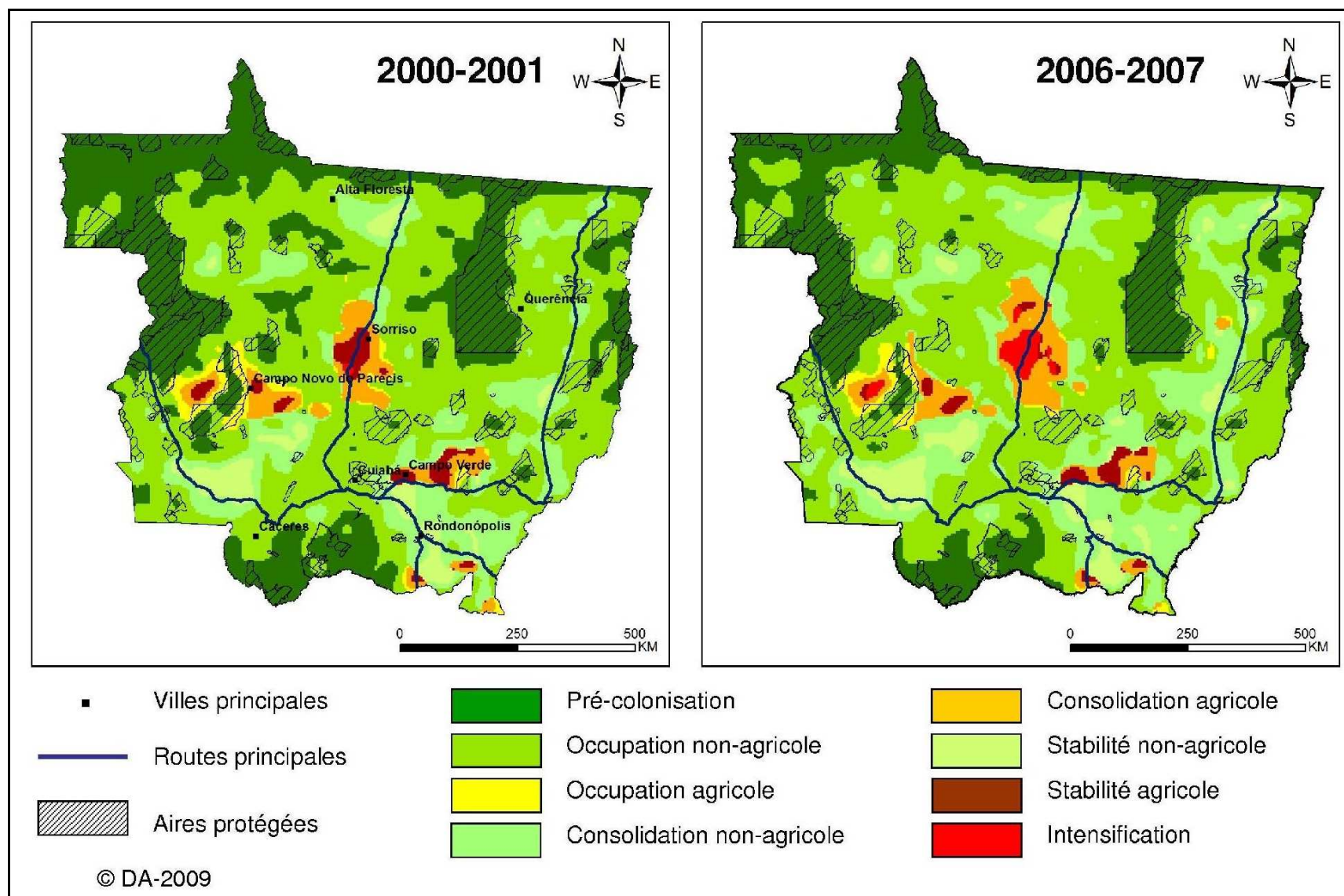


Figure 3.35 : Cartographie des stades de colonisation au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.

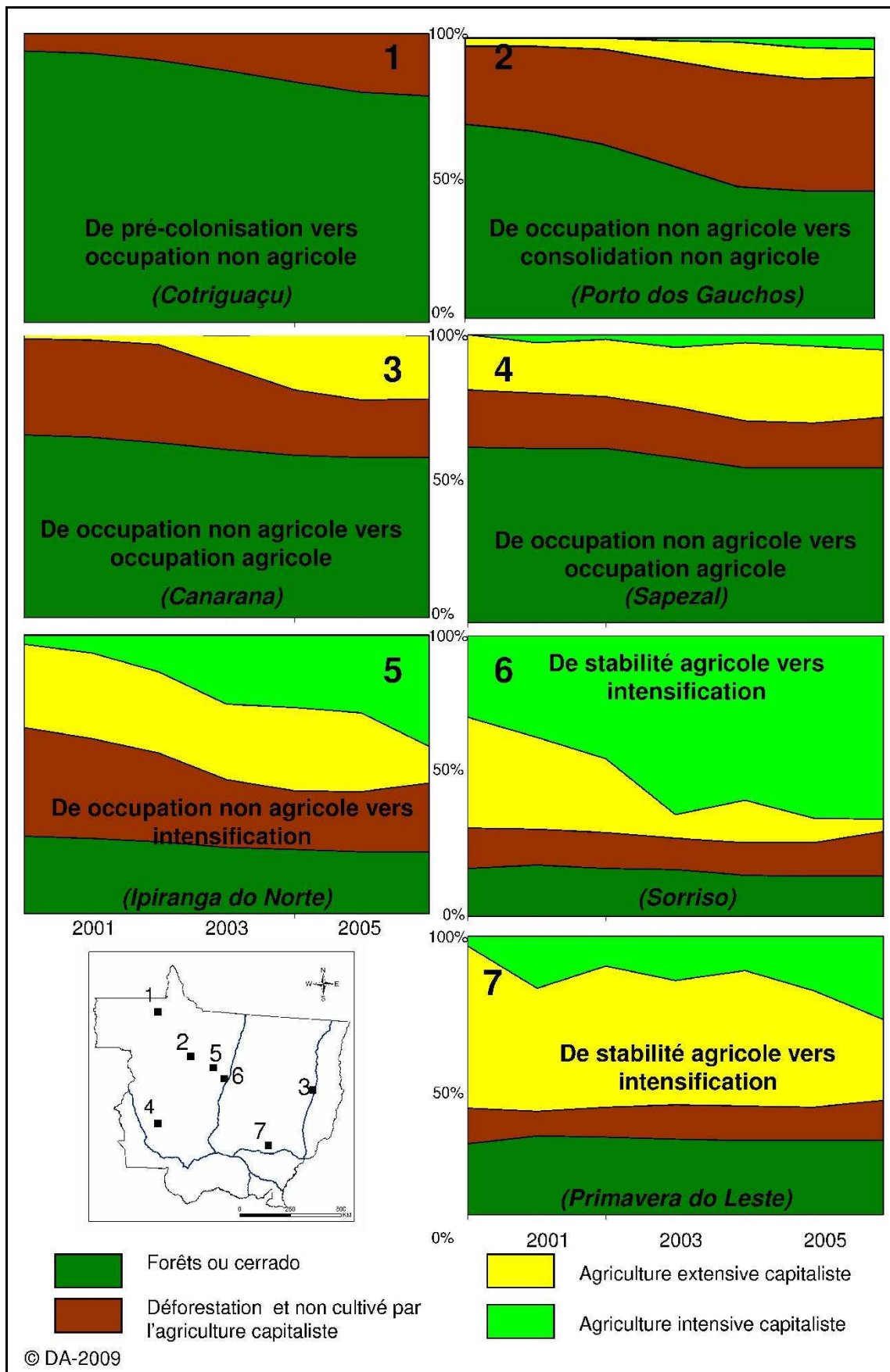


Figure 3.36 : Evolution temporelle des stades d'occupation du sol entre 2000 et 2006 pour sept localités agraires du Mato Grosso

Parmi ces méga-clairières, certaines ont clairement orienté leur développement vers l'agriculture capitaliste et notamment les trois principales régions agricoles déjà présentées auparavant : la région centre, la région de la Chapada dos Parecis et la région sud-est. Celles-ci présentent des dynamiques de colonisation différenciées.

La région la plus dynamique est la région centre, le long de la BR-163. Elle a connu une expansion significative de l'espace de consolidation agricole. Cette expansion a également été accompagnée d'une forte intensification agricole dans un noyau central localisé entre Sorriso et Lucas do Rio Verde qui est passé du stade de stabilité agricole au stade d'intensification agricole (fig. 3.36.6). La région de la Chapada dos Parecis présente également une zone d'intensification, à Sapezal, qui est la principale marque de changement apparente entre les deux années d'étude. Dès lors, les profils spatiaux (fig. 3.37.1 et 3.37.2) de ces deux régions sont ressemblants : la déforestation atteint plus de 80% dans les zones les plus agricoles alors qu'elle est inférieure à 30% dans les zones périphériques. Dans les deux régions, l'intensification agricole est présente même si elle est plus généralisée dans la région de la BR-163. On remarque également dans cette région une plus grande zone défrichée et non exploitée par l'agriculture mécanisée. Ceci traduit l'avancée d'un front d'ouverture en avant du front économique et du front d'intensification. Ce front d'ouverture est représenté sur les cartes de la figure 3.35 par une auréole d'occupation non agricole autour de la région agricole. Dans la Chapada dos Parecis, cette zone non agricole est presque inexistante. On remarque alors une zone d'occupation agricole autour du noyau intensifié de Sapezal (fig. 3.35) qui signifie que la déforestation y est modérée (inférieure à 50% du territoire) et que l'agriculture occupe plus de 50% des zones déboisées. Une telle situation peut s'expliquer, soit par l'existence d'un lien plus fort entre déforestation et expansion agricole, soit par une forte intégration de terres anciennement défrichées dont les anciens propriétaires ne vont pas alimenter la progression du front pionnier plus en avant. Il apparaît ici que la deuxième hypothèse est à privilégier puisque nous avons vu auparavant que l'expansion agricole dans la Chapada dos Parecis se fait surtout sur des parcelles anciennement défrichées. La figure 3.36.4 confirme également ce fait en présentant l'évolution de l'occupation du sol dans la localité agraire estimée au stade d'occupation agricole. On y voit que la déforestation y a été très faible au cours de la période (à comparer avec la forte déforestation qui sévit sur le front de la région centre, fig. 3.36.2). On suppose donc que les anciens propriétaires migrent alors vers les villes où vers d'autres fronts puisqu'il n'existe pas de zone de consolidation non-agricole en avant du front économique. Etant donné la croissance de l'espace de consolidation non agricole autour de Juina, plus au Nord, il serait intéressant de vérifier à partir d'enquêtes de terrain si il existe un lien entre l'avancée du soja dans la Chapada dos Parecis et la déforestation à Juina et/ou Brasnorte.

Les deux principales régions agricoles présentent donc des dynamiques d'occupation du sol très différentes. La région de la BR-163 apparaît comme le principal témoin de l'impact de l'avancée du soja sur les changements d'occupation du sol au Mato Grosso. Ces changements se produisent rapidement puisque, sur une période de sept ans, certaines localités sont passées du stade d'occupation non agricole au stade d'intensification (fig. 3.36.5).

A Querencia (fig. 3.36.3), l'évolution temporelle de l'occupation du sol est en certains points comparable à celle observée sur la Chapada dos Parecis puisque la déforestation est limitée et on aperçoit clairement que l'expansion agricole se fait sur des parcelles anciennement déboisées (puisque la déforestation progresse moins vite que l'expansion des

surfaces cultivées). La différence se situe dans le fait que les surfaces cultivées en soja ont commencé à croître récemment, à partir de 2002-2003. Ainsi, dans de nombreuses localités, l'agriculture capitaliste n'est pas encore majoritaire par rapport aux autres types d'occupation du sol. Le profil spatial (fig. 3.37. 3) confirme cette impression puisque, même au centre de la région agricole, les surfaces cultivées restent minoritaires. C'est pour cela que cette région agricole n'apparaît pas encore clairement sur les cartes de la figure 3.35.

Enfin, au sud-est de l'Etat, la région agricole se trouve en 2006 au stade de consolidation agricole et de stabilité agricole dans quelques zones précises. Cependant, elle se trouvait déjà à ce stade en 2000. En fait, l'expansion des cultures de soja tout comme la déforestation ont été très limitées entre 2000-20001 et 2006-2007 car la majeure partie de ce qui pouvait être déboisé et cultivé l'avait déjà été avant 2000 (fig. 3.13.A et fig. 3.17.A). Le seul changement significatif qui apparaît est une tendance à l'intensification agricole, laquelle ne concerne cependant pas encore 50% des surfaces cultivées en 2006 dans de nombreuses localités (fig. 3.36.7).

Le profil spatial (fig. 3.37.4) confirme ces conclusions puisque l'intensification agricole y est inférieure à ce qui était observé dans la région centre et la Chapada dos Parecis. Les espaces défrichés sont très importants même lorsque l'on s'éloigne des régions agricoles, ce qui se traduit par une large zone de consolidation non agricole autour de la région agricole. Une telle situation a déjà été notée dans la région centre mais, ici, la différence est que cette zone a très peu évolué au cours de la période d'étude. Il n'existe donc pas de lien évident entre la dynamique du soja, traduite ici par l'avancée du front d'intensification, et le front d'ouverture.

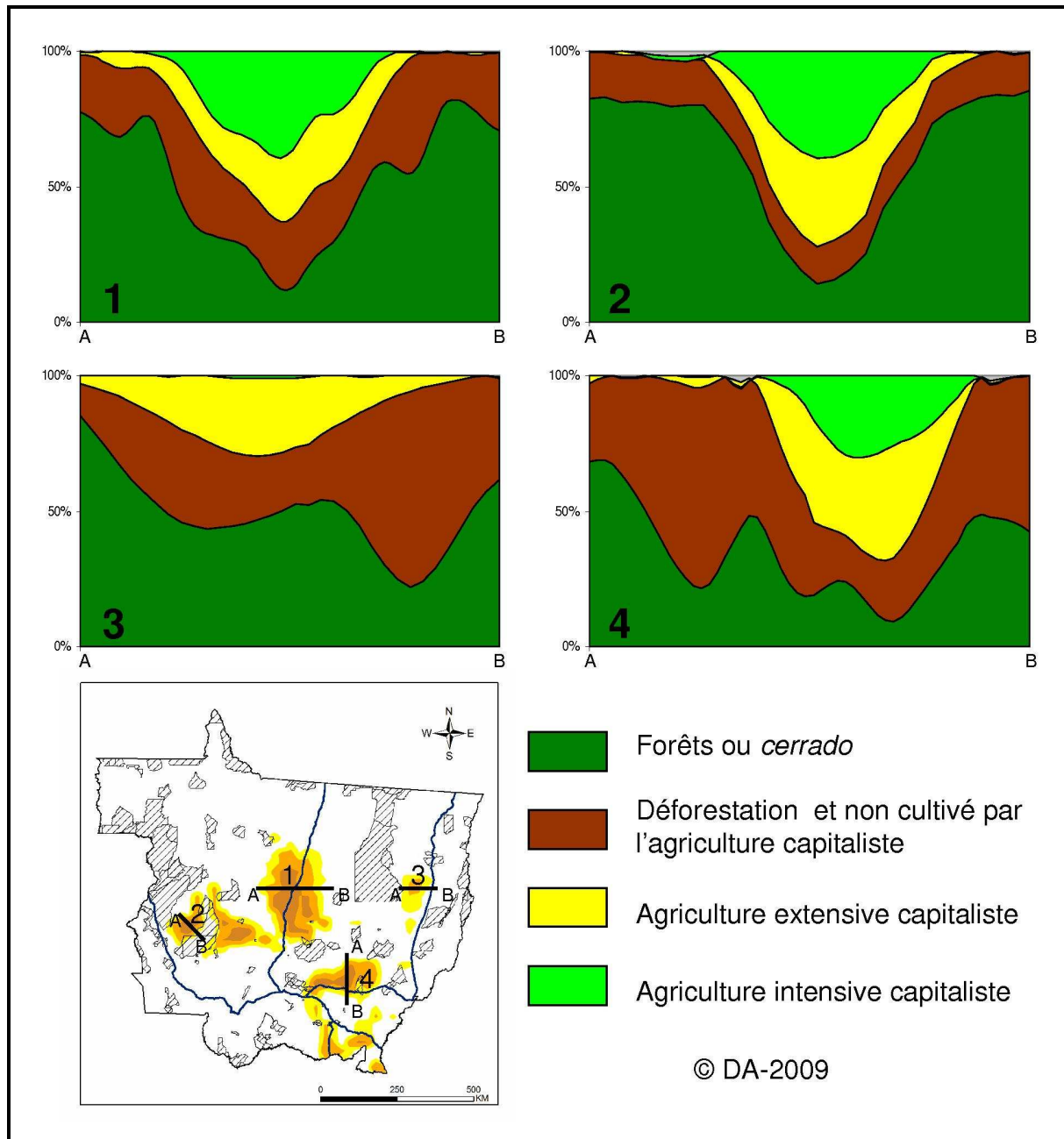


Figure 3.37 : Profils spatiaux de l'occupation du sol en 2006-2007 pour les quatre régions du soja repérées.

6. Conclusion

A l'échelle du Mato Grosso, l'agriculture mécanisée explique 12% des déboisements tandis que 71% de l'expansion agricole se fait sur des parcelles anciennement déboisées. Il existe donc d'autres sources de déforestation plus prédatrices que l'agriculture capitaliste en Amazonie. Toutefois, étant donné les superficies en jeu, le rôle de l'expansion agricole dans le processus de déforestation ne peut être ignoré. On observe notamment de nombreuses conversions directes de forêts en cultures dans la région centre et, dans une moindre mesure, dans la région de la Chapada dos Parecis. Par ailleurs, l'avancée du soja influence également sur la déforestation de manière indirecte. Ainsi, nous avons démontré que dans certaines régions (région centre et région Est notamment) un fort taux d'expansion agricole est lié à un taux de

déforestation élevé dans un rayon de plus de 100 kilomètres. Dans la région agricole Sud-Est, la colonisation est plus ancienne : l'expansion agricole comme la déforestation y sont aujourd'hui modérées.

L'expansion agricole a longtemps été perçue comme l'unique moyen d'augmenter la production agricole. Le suivi de l'évolution des pratiques culturales dans les années 2000 démontre que l'intensification agricole représente aujourd'hui une alternative intéressante afin d'augmenter significativement la production. Dans les « centres historiques » du Mato Grosso, l'intensification agricole explique même plus de 50% de l'augmentation de la production agricole au cours des années 2000. De la sorte, l'intensification agricole freine l'expansion agricole et limite donc la déforestation. Nos résultats indiquent par exemple que, en conservant des pratiques agricoles non intensives, il aurait fallu cultiver 1,68 millions d'hectares supplémentaires pour produire l'équivalent de la récolte 2006-2007. Cependant, l'intensification agricole dans les pôles de production augmente la rentabilité du secteur agricole et incite parfois les producteurs à accroître les superficies cultivées. Ainsi, nous avons démontré que des taux d'intensification agricole élevés entraînent une expansion agricole forte dans un rayon d'environ 150 kilomètres.

Puisque l'intensification agricole explique en partie l'expansion agricole en périphérie des régions agricoles, elle peut être considérée comme un vecteur indirect de déforestation. Les résultats montrent ainsi que plus l'agriculture intensive est adoptée sur un territoire, plus la déforestation est accrue en périphérie des régions agricoles.

L'étude des relations entre les fronts composant le front pionnier permet alors de réaliser un essai de régionalisation des territoires au Mato Grosso. Nous proposons donc une cartographie des stades d'évolution du front pionnier à partir de l'analyse de l'occupation du sol au sein d'une cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Les derniers espaces vierges ou en phase de pré-colonisation sont localisés dans les aires protégées. Une grande majorité de l'Etat se trouve au stade d'occupation non agricole, ce qui signifie que de nombreux espaces sont en cours d'ouverture et que l'agriculture mécanisée n'est pas directement responsable de ces déboisements. Les trois principales régions agricoles (centre, Chapada dos Parecis et Sud-Est) ont atteint le stade de consolidation agricole avant l'année 2000. Dans la région centre, l'espace agricole s'est considérablement étendu au cours de la période d'étude et les communes de Lucas do Rio Verde et Sorriso ont même atteint le stade d'intensification agricole. Enfin, à l'Est, la région agricole n'apparaît pas encore car l'agriculture ne s'y est développée que récemment.

Synthèse de la Partie 3

L'analyse des changements d'occupation et d'utilisation du sol observés par télédétection apporte des réponses à la question de l'importance de la filière agricole, et notamment des producteurs de soja, dans la dynamique du front pionnier matogrossense.

La déforestation est importante au Mato Grosso (347 924 km² défrichés en 2007) et s'organise surtout le long des principaux axes routiers, formant des méga-clairières. Le *cerrado* est plus touché que la forêt (42% du *cerrado* déboisé contre 37% des forêts). Seuls les espaces protégés semblent efficaces pour lutter contre la déforestation.

Les surfaces agricoles occupent 56 172 km² en 2007. Elles ont connu une forte expansion depuis 2000 (+56%). Les cultures se situent principalement en biome de *cerrado* (64% des cultures) mais, actuellement, l'expansion agricole se fait majoritairement dans le biome forestier (68% des nouvelles parcelles agricoles en 2006-2007). Il existe quatre régions agricoles au Mato Grosso (centre, chapada dos Parecis, Est et Sud-Est). La région Est est la plus récente. L'expansion agricole dans ces régions s'organise à partir de « centres agricoles historiques » tels que Lucas do Rio Verde et Sorriso pour la région centre.

Après une forte phase d'expansion, l'agriculture matogrossense est aujourd'hui en phase d'intensification. La diversification s'est accrue entre 2000 et 2007 comme le montre l'évolution de l'indice de diversification (de 1,37 à 1,79). Cela a été rendu possible par l'adoption de systèmes de production en double cultures commerciales intégrant les cultures de maïs et de coton en succession du soja. Cette pratique s'est développée au cours de la période d'étude, passant de 6% à 30% des surfaces agricoles. Toutefois, l'intensification agricole n'est pas équitablement répartie entre les régions agricoles. Par exemple, la région centre présente un taux de surfaces agricoles cultivées en double cultures commerciales (>75%) bien supérieur à celui observé dans la région Est (<10%).

Les dynamiques observées (déforestation, expansion agricole et intensification agricole) sont interdépendantes. Par exemple, 12% des terres déboisées le sont à des fins agricoles. Cependant, 71% de l'expansion agricole se fait sur des terres anciennement défrichées. Ainsi, l'expansion agricole est un vecteur de déforestation mais d'autres activités sont plus prédatrices que l'agriculture mécanisée. De plus, un fort taux d'intensification agricole incite les producteurs à poursuivre l'expansion agricole, et donc indirectement à défricher. Toutefois, il convient de préciser que l'intensification agricole a permis de freiner la déforestation puisqu'il aurait fallu cultiver 1,68 million d'hectares supplémentaires pour atteindre le niveau de production actuel.

En fait, le secteur agricole matogrossense semble rentrer dans une nouvelle phase de développement plus intensive. En effet, l'intensification agricole explique 46% de l'augmentation de la production agricole au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007. Ce taux varie entre 90% et moins de 25% selon les régions agricoles. Le croisement des données géographiques permet alors de proposer un essai de régionalisation des territoires du soja et de cartographie du front pionnier matogrossense.

Il s'agit alors de déterminer quelles variables expliquent ces différences régionales. Le rôle des précipitations est notamment évoqué de manière détaillée dans la quatrième partie.



Sorriso (2007) : Les systèmes convectifs expliquent la variabilité spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso, affectant localement la qualité des récoltes. © DA-2009

Partie 4. Climat et soja : le rôle des précipitations sur les dynamiques spatiales et les productions agricoles du soja

Introduction de la Partie 4

Chapitre 11. Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso

Chapitre 12. La pluviométrie et l'agriculture au Mato Grosso

Synthèse de la Partie 4

Introduction de la partie 4

Les résultats de la partie 3 mettent en avant une régionalisation des territoires du soja au Mato Grosso. Cela se traduit notamment par l'adoption de pratiques culturales différentes selon les régions de production. Notamment, les systèmes de production en double cultures commerciales sont beaucoup plus communs dans les régions centre et Ouest (chapada dos Parecis) que dans les régions Est et Sud-Est. Divers facteurs socio- économiques peuvent expliquer ces différences. Dans cette thèse, nous émettons l'hypothèse que l'adoption de pratiques agricoles dépend aussi des conditions pluviométriques. L'objectif de cette quatrième partie est donc de chercher si le climat est un facteur déterminant à retenir pour comprendre les changements d'occupation et d'utilisation du sol au Mato Grosso. De la sorte, les conditions climatiques peuvent être considérées comme un des facteurs modulant l'avancée du front pionnier et notamment du front d'intensification.

Dans le premier chapitre de cette partie, nous présentons et validons les données de précipitations utilisées afin de caractériser les conditions pluviométriques au Mato Grosso. Les estimations de précipitations par télédétection représentent une alternative intéressante aux données de terrain ; ces dernières étant trop éparées et peu fiables pour mener une étude de qualité à l'échelle régionale ou locale. Ainsi, les produits TRMM 3B42 à une résolution spatiale de $0,25^\circ$ sont traités pour calculer des paramètres de la saison pluvieuse (début, fin, durée et cumul annuel de précipitations).

Dans le deuxième chapitre, ces paramètres sont mis en rapport avec les résultats de la partie 3. Dans un premier temps, nous cherchons à démontrer que le niveau d'intensification agricole observé au sein d'une localité agraire est dépendant des moyennes des paramètres pluviométriques. Enfin, la variabilité des paramètres pluviométriques est analysée et également mise en relation avec le niveau d'intensification agricole. Il s'agit alors de voir si, en intensifiant la production agricole, les producteurs accroissent la vulnérabilité des cultures de soja face aux aléas climatiques. Pour ce faire, les estimations de précipitations des produits TRMM 3B42 retraités sont croisées avec les valeurs de EVI des images MODIS et les rendements observés sur le terrain. Il convient cependant de préciser que l'objectif de ce travail n'est pas d'estimer directement les rendements à partir de données satellitaires mais simplement de déterminer l'existence de dépendances entre ces variables afin d'analyser les impacts de la variabilité pluviométrique sur les pratiques culturales des producteurs de soja.

Chapitre 11 : Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso

1. Introduction

L'étude de la pluviométrie dans les régions tropicales se trouve souvent confrontée au problème de l'insuffisance des données, due à des réseaux de stations peu denses et à de nombreuses lacunes dans les séries historiques (Dubreuil *et al.*, 2004 ; Collischonn *et al.*, 2007). Ainsi, les précipitations de la marge méridionale de l'Amazonie brésilienne sont encore très mal connues : le volume précipité comme la variabilité spatiotemporelle des régimes ont été peu étudiés (Dubreuil *et al.*, 2004). Pour résoudre ce problème, la solution proposée depuis une trentaine d'années consiste à utiliser les données satellites afin d'obtenir des estimations de précipitations homogènes sur toute la surface terrestre, et en particulier sur les océans et les régions en développement. Parmi les différentes estimations existantes, les données issues du spectroradiomètre TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) sont particulièrement intéressantes car elles ont été spécialement conçues pour fournir des informations dans les régions tropicales où tombent près des deux tiers des précipitations globales (Simpson *et al.*, 1996).

Par ailleurs, les régions tropicales sont soumises à une forte pression anthropique comme le montrent les taux de déforestation à ces latitudes. La situation en Amazonie brésilienne et surtout au Mato Grosso illustre parfaitement ce propos. La progression du front pionnier et l'expansion agricole du soja sont la cause de transformations paysagères importantes. La communauté scientifique s'interroge alors sur les conséquences de ces transformations sur le climat et sur les cycles pluviométriques (cf Partie 1 - Chapitre 1). La situation est d'autant plus complexe au Mato Grosso que les nouvelles activités agricoles, et notamment les cultures de soja, sont dépendantes des conditions climatiques.

Ce chapitre vise à améliorer la connaissance de la répartition spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso. Après une brève présentation du climat du Mato Grosso, les données utilisées pour cartographier les régimes pluviométriques au Mato Grosso sont présentées. Les estimations pluviométriques issues des produits satellitaires TRMM 3B42 sont validées par les relevés de pluies au sol. Ces données sont ensuite utilisées pour calculer des paramètres essentiels tels que les dates de début et de fin de la saison pluvieuse ainsi que la durée de celle-ci et les précipitations annuelles. Ces paramètres nous permettent enfin de mettre en relation les régimes pluviométriques moyens et les mécanismes atmosphériques d'échelle globale et régionale à l'origine des précipitations en Amazonie.

2. Le climat du Mato Grosso : des connaissances fragmentaires liées à un réseau d'observation récent et peu dense

L'Amazonie, de par son étendue géographique, est soumise à plusieurs types de climats : un climat équatorial sur sa majeure partie et un climat tropical aux limites méridionales et orientales. Le nord du Mato Grosso se situant justement dans cette partie méridionale correspond à la transition progressive entre ces deux climats qui peut être mise en relation avec la zone de transition entre forêt et *cerrado* (Dubreuil, 2005). Ainsi, cette transition se traduit par un climat subéquatorial dans sa partie nord et plutôt tropical dans les parties méridionales et occidentales du Mato Grosso. Les températures sont assez homogènes au cours de l'année (entre 22 et 26°C en moyenne) et l'amplitude thermique diurne est

régulièrement supérieure à l'amplitude thermique moyenne annuelle (10°C au Mato Grosso ; Jallet, 2001).

Dans ces conditions, la pluviométrie est le facteur principal permettant de caractériser les différents climats de cette région. Celle-ci est marquée par une forte variabilité qui se ressent à différentes échelles spatiales et temporelles. Comprendre cette variabilité implique de s'intéresser aux mécanismes généraux à l'origine des précipitations dans la région. La variabilité interannuelle et les rythmes saisonniers sont expliqués par des mécanismes globaux qui définissent la répartition des précipitations à l'échelle de l'Amazonie. A l'inverse, la variabilité spatio-temporelle locale est liée au relief (fig. 4.1) et surtout à des mécanismes de méso-échelle¹ menant au développement de systèmes convectifs (Durieux, 2002).

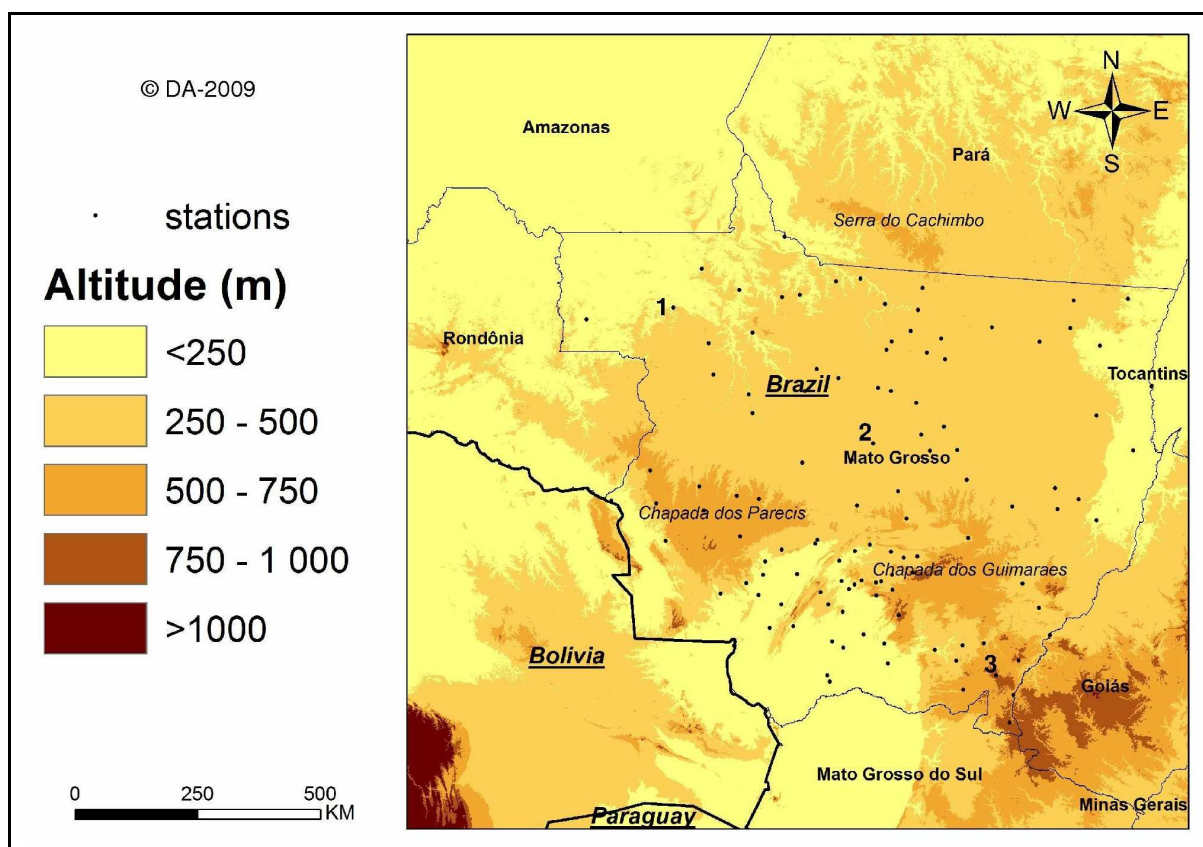


Figure 4.1 : Carte du relief du Mato Grosso et des 116 stations répertoriées au Mato Grosso. La carte du relief est issue des données SRTM (résolution spatiale de 90 m).

Au Mato Grosso, les cycles saisonniers opposent deux saisons : une saison sèche en hiver austral, autour de juin-juillet-août et une saison pluvieuse en été austral, autour de décembre-janvier-février. Les différences pluviométriques s'organisent selon un gradient nord/sud dictant la durée de la saison des pluies et, par la même, les précipitations annuelles (Ratisbona, 1976 ; Figueroa et Nobre, 1990 ; Dubreuil, 2005). La saison sèche s'étale sur 3 mois au nord (avec des précipitations supérieures à 2000 mm/an) et 5 mois au sud (avec des précipitations légèrement supérieures à 1000 mm/an) (figure 4.2). Les régions de climat tropical à longue saison sèche au sud de l'Etat s'opposent donc à celles de climat sub-équatorial au nord (Sette, 2000).

¹ La taille minimale des systèmes convectifs de méso-échelle est de 3500 km² selon Durieux (2002).

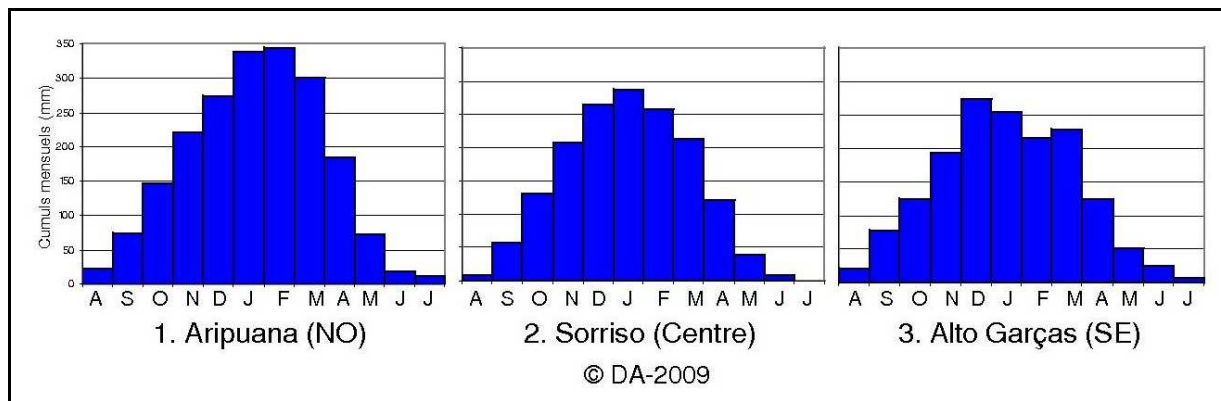


Figure 4.2 : Précipitations mensuelles moyennes pour 3 stations du Mato Grosso localisées sur la carte de la figure 4.1 (Source : ANA).

La saisonnalité des régimes pluviométriques se traduit par une clôture de la saison sèche au mois de septembre avec l'arrivée des premières pluies. Toutefois, celles-ci ne se généralisent qu'à partir des mois d'octobre et novembre : « *en cette saison, l'ensemble de la région bascule dans un système de basses pressions, les masses d'air sec associées à l'anticyclone tropical de l'Atlantique sud refluant vers le sud-est et laissant la place aux basses pressions continentales* » (Dubreuil *et al.*, 2004). De décembre à mars, les systèmes convectifs amazoniens se développent dans un flux dominant de mousson de N, NW (Zhou et Lau, 1998) en relation avec la ZCIT (Zone de Convergence Inter Tropicale), la ZCAS (Zone de Convergence de l'Atlantique Sud) et la ZCEC (Zone de Convergence Equatoriale Continentale) (figure 4.3).

La ZCIT correspond à la branche ascendante de la cellule de Hadley qui permet de redistribuer l'énergie reçue dans les zones excédentaires (latitudes équatoriales) vers les zones déficitaires (latitudes subtropicales) selon une orientation méridienne. Ces cellules prennent leur origine avec des ascendances de masses d'air importantes au niveau de l'équateur, créant un phénomène de divergence dans les hautes couches et de convergence dans les basses couches. Cette convergence qui donne naissance aux alizés de NE dans l'hémisphère nord et de SE dans l'hémisphère sud. Ceux-ci se rejoignent dans une zone de forte convection, considérée comme l'équateur météorologique et appelée ZCIT. La position de cette zone est en mouvement constant et dépend notamment des températures de surface des océans. Ainsi, en Amazonie, la ZCIT remonte vers le nord en hiver austral lorsque l'Atlantique nord est plus chaud que l'Atlantique sud. Dans le cas contraire, la ZCIT descend jusqu'au sud de l'Amazonie expliquant alors la saison pluvieuse de l'été austral.

La ZCAS se forme à partir de la convergence d'alizés et de circulations extra tropicales (Espinoza Villar, 2009). Elle est présente toute l'année mais elle est plus intense pendant le printemps et l'été de l'hémisphère Sud. Orientée NW-SE, selon le même axe que le jet subtropical, il s'agit d'une zone de convergence dans une masse d'air humide et instable (Nogués-Peagle et Mo, 1997 ; Liebmann et Marengo, 2001). « *Au sein de ce système circulent des perturbations de taille variable : instabilités de nord-est (INE) ou de nord-ouest (INW) mais aussi des lignes d'instabilité générées par des systèmes extra tropicaux* » (Dubreuil *et al.*, 2004). Le retrait des systèmes pluviogènes se produit généralement du Sud vers le Nord et, à partir de mai et surtout du mois de juin, on entre dans la saison sèche. « *Cette région passe alors sous l'influence de l'Anticyclone Tropical Atlantique (ATA) qui affecte le Mato Grosso en progressant de l'ESE à l'WNW en donnant un type de temps stable de juin à septembre (masse d'air de type Tropical Atlantique Continentalisé)* » (Dubreuil *et al.*, 2004).

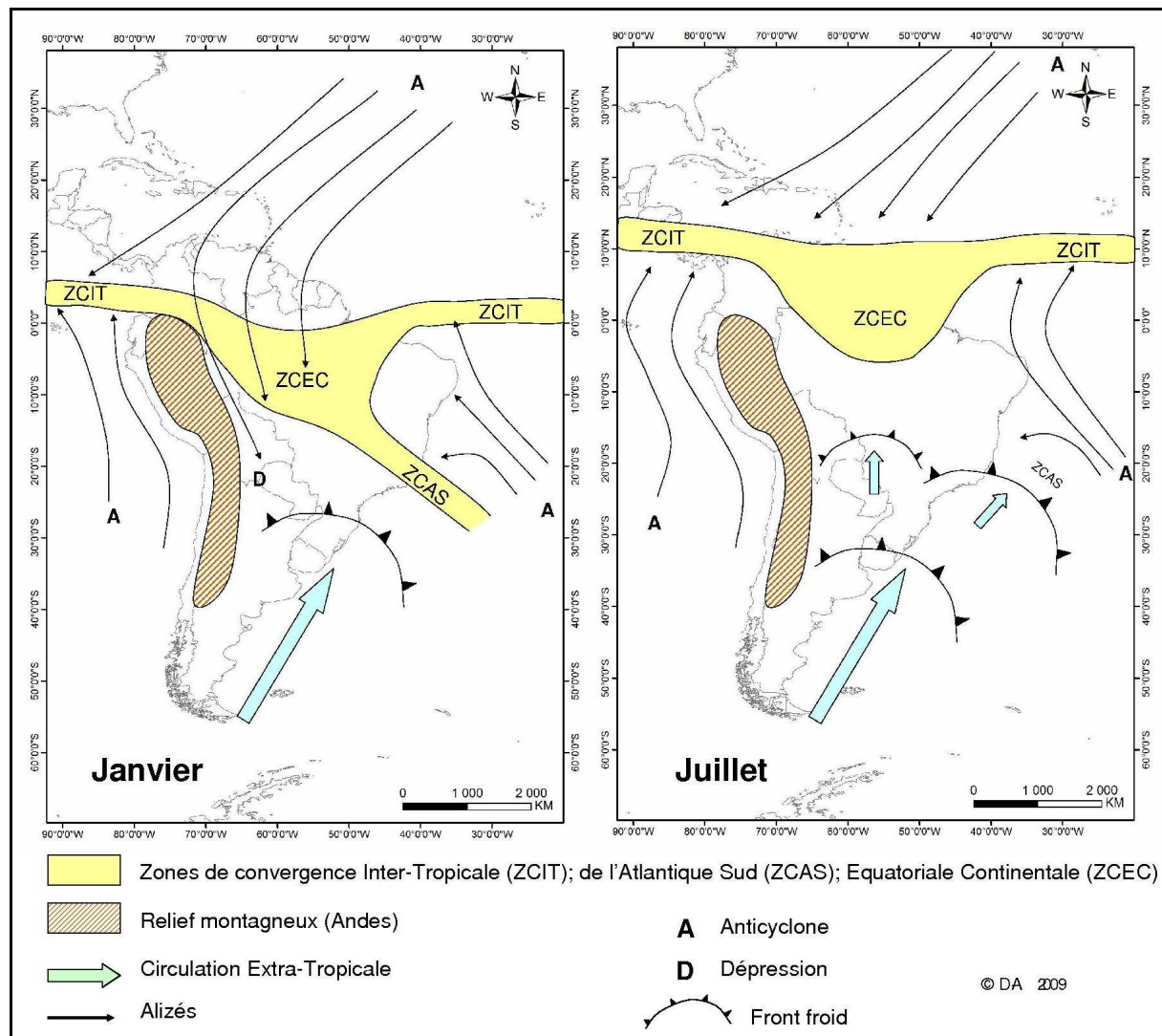


Figure 4.3 : Schéma de la circulation atmosphérique en Amérique du Sud en janvier (été austral) et juillet (hiver austral). D'après Espinoza Villar (2009) et Durieux (2002).

A l'inverse des cellules de Hadley qui permettent de redistribuer l'énergie des basses latitudes vers les hautes latitudes, des cellules zonales redistribuent l'énergie selon un axe est / ouest (fig. 4.4). Les précipitations en Amazonie dépendent de la cellule de Walker du Pacifique et de la cellule de l'Atlantique. La cellule de Walker se compose d'une région de fortes ascendances dans le Pacifique ouest en raison de températures de surface océaniques (TSO) supérieures à celles rencontrées dans le Pacifique est. Cette dernière région est alors caractérisée par une forte subsidence. Celle-ci est également alimentée par la forte activité convective au-dessus de l'Amérique du Sud qui crée une seconde région de subsidence en Atlantique. Ce schéma classique est régulièrement perturbé par des événements appelés El Niño Southern Oscillation (ENSO) (dont la période de retour est de 2 à 10 ans selon Beltrando, 2004) et La Niña Southern Oscillation (LNSO) qui expliquent une partie de la variabilité interannuelle des précipitations en Amazonie (Ronchail *et al.*, 2002). En période ENSO, les eaux du Pacifique se réchauffent à l'est, ce qui fait baisser la pression et entraîne un affaiblissement voire une inversion de la cellule de Walker. Les masses d'air ascendantes résultant de cette surchauffe apportent de fortes précipitations sur la côte ouest de l'Amérique du Sud et de faibles précipitations en Amazonie. En période LNSO, le phénomène inverse se produit et l'Amazonie subit des précipitations supérieures à la moyenne. Cependant, tout le bassin amazonien n'est pas affecté de la même manière par les événements ENSO et LNSO.

Ainsi, la figure 4.5 montre les coefficients de corrélation mesurés entre les précipitations ou les températures de surface et un indice multivarié de ENSO (MEI)¹. Il apparaît que les épisodes ENSO sont associés avec des baisses de précipitations et des hausses de températures en Amérique du Sud tropicale (Garreaud *et al.*, 2008). Toutefois, le climat du sud de l'Amazonie est modérément affecté par l'ENSO puisque les fortes corrélations sont surtout observées au nord du bassin.

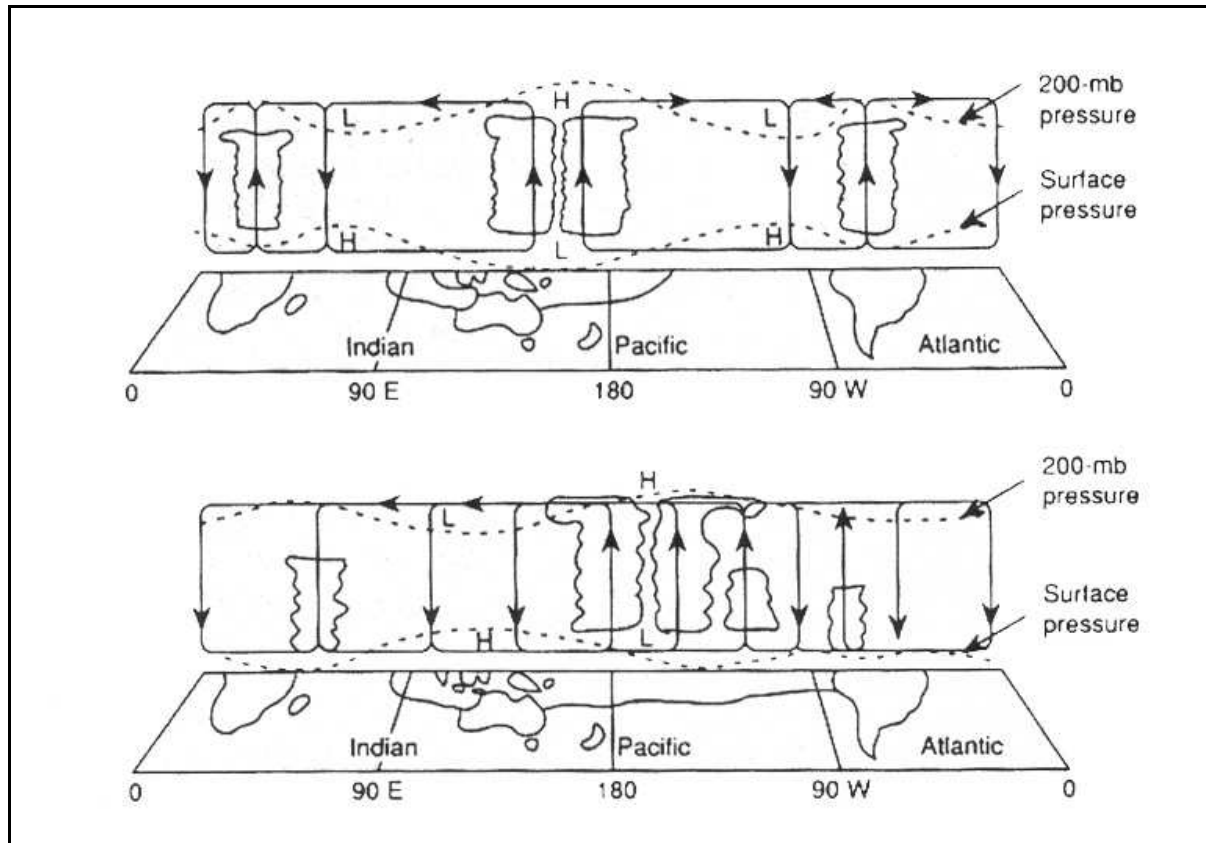


Figure 4.4 : Schémas des circulations zonales en période normale (en haut) et en période ENSO (en bas). D'après Holton in Durieux (2002).

¹ Le MEI est un indice composite qui est mesuré par la première composante d'une ACP effectuée sur 6 variables : pression au niveau de la mer, composantes des vents de surface zonaux et méridiens, température de surface océanique, température de surface et nébulosité.

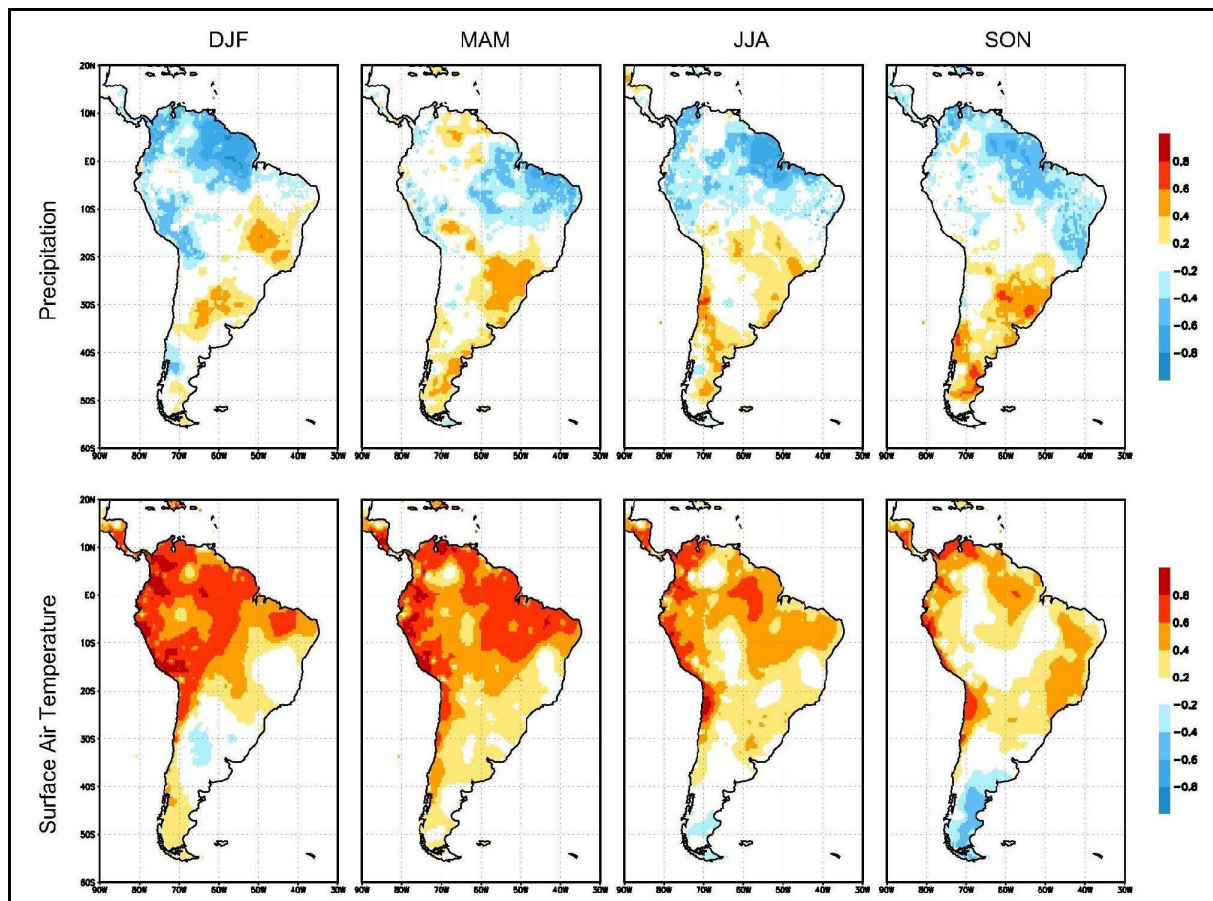


Figure 4.5 : Corrélations entre les MEI (Indice Multivarié de ENSO) et les précipitations et les températures de l'air (Garreaud *et al.*, 2008).

Les mécanismes d'échelle globale contrôlent donc une partie de la variabilité climatique interannuelle et les rythmes saisonniers. La forte activité convective repérée dans le bassin amazonien en été austral est notamment favorisée par la mise en place de la ZCAS et le déplacement au sud de la ZCIT. Cependant, les systèmes convectifs entraînent une forte variabilité spatio-temporelle à l'échelle régionale, voire locale. Selon Durieux (2002), 82% des précipitations en Amazonie sont issues de ces systèmes convectifs de méso-échelle. Ceux-ci correspondent à des ascensions de masses d'air chaud et humide qui forment des cumulonimbus très pluvio-gènes. L'intensité de ces précipitations dépend alors de la quantité en vapeur d'eau transportée et de la hauteur du nuage (jusqu'à 18 km pour les cumulonimbus). En Amazonie, la vapeur d'eau contenue dans les systèmes convectifs peut être d'origine maritime (évaporation des océans) ou terrestre (évaporation des surfaces en eau et transpiration des forêts). Le couvert forestier joue notamment un rôle important dans les mécanismes pluviométriques. D'une part, il produit par évapotranspiration une partie de l'eau précipitée en Amazonie. Il existe ainsi un taux de recyclage des précipitations élevé à l'intérieur du bassin, variant entre 20 et 60% des précipitations selon les auteurs et les méthodes de calcul (Eltahir et Bras, 1996 ; Molion, 1975 ; Marengo, 2005). D'autre part, la continuité du couvert forestier permet le maintien de la progression des flux maritimes vers l'intérieur du bassin. La forêt agit en effet comme une pompe d'humidité atmosphérique qui permet le transport de l'humidité d'origine maritime loin à l'intérieur du continent (Makarieva *et al.*, 2009 ; Sheil et Murdiyarso, 2009). Toute discontinuité observée du couvert forestier, résultat de la déforestation, accroît donc la variabilité spatio-temporelle des précipitations (Durieux *et al.*, 2003). Or, celle-ci est importante à considérer car elle influe directement sur les pratiques agricoles adoptées dans les régions tropicales. L'objectif est donc d'évaluer cette

variabilité à partir de données satellitaires dont la qualité doit être validée à partir d'observations au sol.

3. Données disponibles

3.1. Données de terrain

Les connaissances générales relatives à la pluviométrie restent peu précises du fait des lacunes des observations. Le réseau pluviométrique au sol du Mato Grosso est constitué d'une douzaine de stations gérées par l'*Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET) et d'une centaine de stations exploitées par l'*Agência Nacional de Águas* (ANA). D'implantation récente, ces stations souffrent souvent d'un manque d'entretien conduisant à de nombreuses lacunes dans les séries (Dubreuil *et al.*, 2004). En outre, le réseau de stations est très hétérogène. En Amazonie brésilienne, la plupart des stations ont été installées dans les années 1970, après le développement des routes transamazoniennes et des projets de colonisation. Ainsi, la distribution spatiale des pluviomètres n'est pas aléatoire mais organisée le long des routes et des fleuves (Ronchail *et al.*, 2002).

Par conséquent, les pluies de la région forestière du nord de l'Etat, plus récemment colonisée, sont moins bien connues que celles de la région méridionale. Pour cette étude, 116 stations aux séries sans lacune sont utilisées pour l'année climatologique allant du 1^{er} août 2004 au 31 juillet 2005. Les données de ces stations ont été acquises auprès de l'ANA (*Agencia Nacional das Aguas*) qui recense 181 stations en service au Mato Grosso à cette date. 65 stations dont les séries sont incomplètes ont été éliminées. Les stations sélectionnées présentent l'intérêt d'être bien réparties sur le territoire *matogrossense* et ainsi, de prendre en compte la diversité climatique de cette région (figure 4.1). Celles-ci servent alors de référence pour valider la qualité des données TRMM 3B42 pour la période considérée, comprise entre le 1^{er} août 1998 (première année de mise en service de la mission TRMM) et le 31 juillet 2007 (soit neuf années pluviométriques complètes). La fenêtre d'étude s'étend de 5° à 20°S et de 50° à 65°W.

3.2. Intérêt des données TRMM 3B42

La plateforme TRMM a été lancée en 1997 (Jobard, 2001) est le fruit d'un projet mené conjointement par les Etats-Unis et le Japon. Ce projet a pour objectif de fournir des estimations de précipitations et d'émissions de chaleur latente à l'échelle tropicale, données particulièrement importantes pour la compréhension du climat terrestre. Puisque les tropiques sont couverts à 75% par les océans, les précipitations dans cette région ne peuvent être mesurées indirectement que par satellite (Simpson *et al.*, 1996).

Au début des recherches dans ce domaine, dans les années 1970, les estimations de précipitations par satellite étaient réalisées par des satellites géostationnaires (GOES ou METEOSAT par exemple) à partir des données du canal visible pour la distinction des cirrus non pluviogènes, et du canal infrarouge pour la mesure de la température du sommet des nuages et sa mise en relation avec les précipitations au sol (Petty, 1995 ; Jobard, 2001). Par la suite, des capteurs à micro-ondes passives ont été employés (de type SSM/I en 1987) sur des orbites polaires (selon les fréquences de réception, il est possible de s'intéresser aux cristaux de glace ou aux gouttelettes d'eau).

Par ailleurs, les données radar au sol sont régulièrement utilisées pour l'étude des précipitations y compris pour valider les méthodes satellitaires (Guillot, 1996 ; Cadet et Guillot, 1991). La particularité des données TRMM consiste dans le fait que les algorithmes d'estimation des précipitations combinent ces différents types de données. En effet, la plateforme TRMM dispose à son bord de capteurs micro-ondes (TMI pour TRMM Microwave Imager), radar (PR pour Precipitation Radar) et visible/infrarouge (VIS/IR) (Simpson *et al.*, 1996 ; Kummerow *et al.*, 2000 ; Jobard, 2001). Lors de travaux de validation des données satellitaires réalisés à partir de deux réseaux de pluviomètres basés en Afrique, Jobard (2001) a démontré la supériorité des méthodes basées sur la combinaison de plusieurs données au pas de temps mensuel. Par contre, pour les mesures instantanées, le capteur micro-ondes s'avère plus performant. Toujours d'après Jobard (2001), les estimations des pluies TRMM 3B42 et GPCP (Global Precipitation Climatology Project) (Huffman *et al.*, 1995a), combinant des données micro-ondes et infrarouges des satellites géostationnaires en plus des données terrain, s'avèrent être les plus performantes.

Dans cette étude, parmi l'ensemble des bases de données TRMM pré-calibrées et/ou pré-analysées, les données utilisées sont les produits tri-horaires TRMM 3B42 à une résolution spatiale de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Ces données combinent des synthèses d'images TRMM et d'autres données satellitaires (Huffman *et al.*, 1995b). Ainsi, les capteurs micro-ondes des satellites AQUA, NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) et les données visible/infrarouge des satellites géostationnaires sont pris en compte dans les algorithmes d'estimation des précipitations (Huffman *et al.*, 2007). Ces estimations sont ensuite ajustées en incorporant les mesures climatiques mensuelles au sol des réseaux GPCP et CAMS (*Climate Assessment and Monitoring System*) pour donner les produits mensuels TRMM 3B43. Les coefficients d'ajustement calculés pour ce produit sont enfin appliqués aux données tri-horaires pour fournir le produit final TRMM 3B42 (version 6) (Huffman *et al.*, 2007).

4. Méthodes

4.1. Validation des données TRMM 3B42

Les données TRMM 3B42 sont utilisées pour caractériser la variabilité spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso. Cependant, une première étape de validation des données est nécessaire pour s'assurer de leur qualité et déterminer une résolution spatiotemporelle optimale pour leur utilisation. Au Brésil, et plus précisément au Mato Grosso, les données TRMM 3B42 ont été jugées de bonne qualité par Collischonn *et al.* (2006) et Collischonn *et al.* (2007). Ces auteurs les ont testées à une résolution spatiale de $0,10^\circ$ pour évaluer leur cohérence en terme de volume moyen précipité et de champs de précipitations pour le bassin du Haut Paraguay, au sud du Mato Grosso. Dans le bassin de la Plata, qui draine en partie cinq pays sud-américains (Brésil, Argentine, Paraguay, Uruguay et Bolivie), Su *et al.* (2008) ont démontré la fiabilité de ces mêmes données au pas de temps mensuel. Ils ont complété en affirmant que, au pas de temps journalier, les données TRMM 3B42 détectent correctement les événements pluvieux même si ils remarquent une tendance à surestimer les forts événements pluvieux. Par ailleurs, les résultats de la validation ne sont pas uniformes sur tout le bassin. Par exemple, les estimations des précipitations pour les sous bassins au nord du bassin de la Plata sont moins bonnes que pour les sous bassins centraux. Cette hétérogénéité spatiale a également été détectée par Islam et Uyeda (2007) au Bangladesh. Ceux-ci remarquent en effet que les données TRMM 3B42 (version 5)

surestiment (sous-estiment) les précipitations dans les régions sèches (humides). Ces mêmes auteurs distinguent également des différences sensibles dans la qualité des estimations au cours de l'année. En Côte d'Ivoire, Bigot (2004) confirme le fait que la validation des données TRMM varie en fonction de la saison.

Dans notre étude, la validation doit se faire à l'échelle du Mato Grosso qui présente la particularité de se trouver dans une zone de transition entre un climat tropical au sud et un climat subéquatorial au nord. La comparaison de données satellitaires avec des mesures ponctuelles fournies par des stations est difficile. Dans un cas idéal, il faudrait en fait disposer de plusieurs stations par pixel TRMM 3B42 (Shimizu *et al.*, 2001). Malheureusement, au Mato Grosso, seuls deux pixels localisés au sud de l'état contiennent deux stations. Selon Grimes *et al.* (1999), il faut alors soit dériver des mesures ponctuelles à partir des données satellites, soit interpoler les données terrain à la même résolution que les données satellitaires (le krigeage représente la méthode d'interpolation optimale selon les mêmes auteurs). Or, les précipitations en Amazonie, principalement d'origines convectives (Durieux, 2002), sont caractérisées par une variabilité spatiale très forte qui peut affecter certaines régions, certaines communes, voire certaines parcelles et toute interpolation à partir d'un réseau de stations aussi peu dense apparaît inappropriée. En effet, le seuil de superficie minimale pour qualifier un système convectif de méso-échelle en Amazonie varie entre 3500 et 10000 km² (Durieux, 2002) alors que le réseau au sol de l'ANA en 2004-2005 ne propose qu'une station tous les 7810 km² en moyenne (mais dont une majorité se trouve en fait au sud de l'Etat). Pour ces raisons, il a été décidé de réaliser cette étape de validation à partir des 116 stations sélectionnées en comparant leurs mesures au pixel TRMM 3B42 correspondant. Plusieurs pas de temps (1 jour ; 5 jours ; 10 jours ; 30 jours) sont testés afin de déterminer l'échelle temporelle la plus fine permettant l'utilisation des données TRMM 3B42. Par ailleurs, la validation des estimations de précipitation doit prendre en compte deux critères :

- ***l'intensité*** : les estimations de précipitations sont-elles efficaces pour détecter les volumes précipités ?
- ***la temporalité*** : les estimations de précipitations sont-elles efficaces pour détecter les périodes pluvieuses ?

Pour répondre à la première question, Laurent *et al.* (1998) proposent différents critères statistiques permettant de valider la qualité de données satellites par rapport aux données de terrain. Pour un jeu de données de références v_i (d'estimation e_i) comprenant n valeurs avec $i = (1, n)$ dont la moyenne est définie par \bar{v} (\bar{e}) et l'écart-type par σ_i (σ_e), les critères proposés sont le coefficient de corrélation, le biais, le RMSE (*Root Mean Square Error*) et l'indice de Nash (tableau 4.1). Cet indice mesure une distance relative entre l'estimation et la référence. Si $I = 1$, l'estimation est parfaite et si $I = 0$, l'estimation égale la moyenne des valeurs de référence).

Critère statistique	Equation
coefficient de corrélation R	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(e_i - \bar{e})}{n\sigma_v\sigma_e}$
biais	$B = \bar{e} - \bar{v}$
RMSE (Root Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - v_i)^2}$
Indice de Nash	$I = 1 - \frac{RMSE^2}{\sigma_v^2}$

Tableau 4.1 : Equations correspondant aux critères statistiques utilisés dans cette étude pour un jeu de données de références v_i (d'estimation e_i).

Pour répondre au critère de temporalité, Su *et al.* (2008) présentent quatre autres critères statistiques permettant de réaliser cette évaluation à partir d'une table de contingence 2 x 2 suivant le modèle présentée dans le tableau 4.2 :

		TRMM	
		jour pluvieux	jour non pluvieux
Station	jour pluvieux	A	C
	jour non pluvieux	B	D

Tableau 4.2 : Table de contingence pour la validation de la qualité des données TRMM à détecter les périodes pluvieuses (dans l'exemple, une période = un jour).

Les quatre critères issus de cette table de contingence sont :

1. le Frequency Bias Index (FBI) est le rapport entre le nombre de jours pluvieux détectés par les données satellite et les données de terrain. Le FBI est compris entre 1 et l'infini et l'estimation idéale est 1. Cet indice indique si il existe une tendance à surestimer (FBI > 1) ou sous-estimer (FBI < 1) les événements pluvieux.
2. le Probability of Detection (POD) indique la proportion de précipitations correctement détectées par le satellite. Le POD varie entre 0 (détection nulle) et 1 (détection parfaite).
3. False Alarms Ratio (FAR) indique la proportion de précipitations détectées par le satellite qui étaient en fait des erreurs. Le FAR varie entre 0 (détection parfaite) et 1 (détection nulle).
4. Equitable Threat Scores (ETS) indique la proportion des précipitations observées et/ou détectées qui a été correctement détectée, ajustée par le nombre d'estimations correctes He qui pourraient être obtenues aléatoirement. Il peut donc être comparé à l'indice de Kappa utilisé couramment en télédétection.

Ces critères sont calculés à partir des équations présentées dans le tableau 4.3. Différents seuils de précipitations journalières (0,1 ; 1 ; 5 ; 10 et 20 mm/jour) sont appliqués afin d'évaluer le potentiel des données TRMM 3B42 pour la détection des événements pluvieux forts ou faibles.

Critère statistique	Equation
Frequency Bias Index	$FBI = \frac{A + B}{A + C}$
Probability of Detection	$POD = \frac{A}{A + C}$
False Alarms Ratio	$FAR = \frac{B}{A + B}$
Equitable Threat Scores	$ETS = \frac{A - He}{A + B + C - He}$ <p>Avec $He = \frac{(A + C) \times (A + B)}{N}$ où N est le nombre total d'estimations.</p>

Tableau 4.3 : Equations correspondant aux critères statistiques utilisés dans cette étude pour valider les données TRMM 3B42. Les variables A, B et C sont définies d'après le tableau 4.2.

4.2. Pré-traitement des produits TRMM 3B42

Pour effectuer une analyse complète de la variabilité spatiotemporelle des précipitations, les cumuls pluviométriques et la temporalité de la saison des pluies sont considérés. Les données TRMM 3B42 doivent donc être prétraitées. D'une part, les données tri-horaires sont cumulées pour composer des cumuls mensuels à partir desquels les régimes pluviométriques sont analysés. D'autre part, les données sont employées à la résolution temporelle optimale définie en phase de validation pour calculer des paramètres temporels définissant la saison des pluies.

4.2.1. Le choix des paramètres définissant la saison des pluies

Les paramètres retenus ici sont le début, la fin et la durée de la saison pluvieuse : ils ont été choisis à cause de leur importance pour l'agriculture, et notamment pour la culture du soja. Le choix de la date de semis du soja est directement lié à la date de début de la saison pluvieuse. Or, les producteurs ont souvent du mal à déterminer efficacement le véritable début des pluies et se fixent alors individuellement des critères pour estimer une date de semis optimale. Toutes les *fazendas* disposent de pluviomètres manuels à partir desquels les producteurs déterminent leur calendrier agricole. Ces critères personnels consistent par exemple à estimer que le début de la saison des pluies correspond à la troisième pluie de plus de 20 mm intervenant au mois de septembre ou à un cumul pluviométrique de 100 mm à partir de début septembre. Ce sont donc des critères très subjectifs que les exploitants retiennent, tout en prenant en compte les caractéristiques propres à leur exploitation. En effet, les exploitations sont très grandes (quelques centaines voire milliers d'hectares) et le semis se réalise donc sur plusieurs semaines. Ainsi, si le début du semis est trop tardif, c'est tout le fonctionnement et donc la rentabilité de la fazenda qui s'en trouve perturbé puisque cela décale aussi le semis de la seconde culture de maïs ou de coton qui doit s'enchaîner à partir de

janvier-février. Or, la bonne tenue de cette culture est plutôt liée à la date de fin des pluies. Par exemple, certains producteurs estiment qu'il n'est plus possible de semer le maïs après le 20 février car les précipitations en fin de saison pluvieuse ne sont plus suffisantes pour assurer une bonne croissance végétative. Cela permet aussi de profiter de la saison sèche pour récolter, sans se soucier d'aléas climatiques trop préjudiciables (la récolte du soja en février étant au contraire souvent perturbée par de fortes précipitations).

D'une manière plus générale, la pluviométrie a également des conséquences régionales sur d'autres facteurs importants à prendre en compte. Par exemple, les routes, qui bien souvent ne sont pas asphaltées, deviennent rapidement impraticables en période de pluie. Des situations pluviométriques extrêmes peuvent également être un facteur indirect de pollution. Ainsi, les cours d'eau sont plus pollués par les produits phytosanitaires lors de forts événements pluvieux car l'érosion des sols est alors plus forte. De plus, lors de ces événements, la pollution est encore accentuée par l'application accrue de produits toxiques visant à contrôler certaines maladies du soja liées aux fortes pluies. Au contraire, une saison sèche très marquée peut entraîner des feux de forêts ou de savane (*cerrado*) dévastateurs.

4.2.2. Les méthodes de calcul des paramètres de la saison des pluies

De nombreux travaux ont déjà été effectués avec l'objectif de déterminer le début et la fin de la saison pluvieuse dans les régions tropicales, que ce soit en Afrique ou en Amazonie. Selon Balme *et al.* (2005), il existe en fait plusieurs définitions du début de la saison des pluies selon les domaines d'intérêt. Ainsi, un météorologue considérera comme début des pluies les premières précipitations liées à la mise en place de la première convection organisée. Pour l'hydrologue, ce même critère sera déterminé par la première pluie générant du ruissellement. Enfin, pour l'agronome, le début de la saison pluvieuse ne peut pas être suivi d'épisodes secs trop longs pouvant porter préjudice aux cultures. C'est ce dernier point de vue qui est considéré ici puisque l'objectif final de cette étude est de mettre en relation les conditions pluviométriques avec la culture du soja au Mato Grosso.

Il existe différentes méthodes pour estimer les dates de début et de fin de la saison des pluies et sa durée. Pour Marengo *et al.* (2001), le début (*la fin*) de la saison pluvieuse en Amazonie intervient lors de la pentade (période de 5 jours) enregistrant un cumul de précipitations journalières moyen supérieur (*inférieur*) à 4 mm par jour avec au moins six des huit pentades suivantes (*précédentes*) ayant un cumul journalier moyen supérieur (*inférieur*) à 4,5 mm, et six des huit pentades précédentes (suivantes) ayant un cumul journalier moyen inférieur à 3,5 mm (figure 4.6). Au Nigéria, Odekunle (2006) applique une méthode basée sur le pourcentage de précipitations cumulées par pentade (figure 4.6). La date de début (*fin*) des pluies est déterminée par le calcul du rayon de courbure appliqué à la courbe représentant le pourcentage de précipitations annuelles cumulées par rapport au temps. Le début (*fin*) de la saison pluvieuse correspond alors à la première (*dernière*) pentade de rayon de courbure positif (*négatif*) maximal. L'auteur applique une variante de cette méthode en utilisant le pourcentage cumulé du nombre de jours pluvieux par pentade au lieu des quantités précipitées. Cette méthode présente l'inconvénient d'être très influencée par des événements pluvieux intenses localisés.

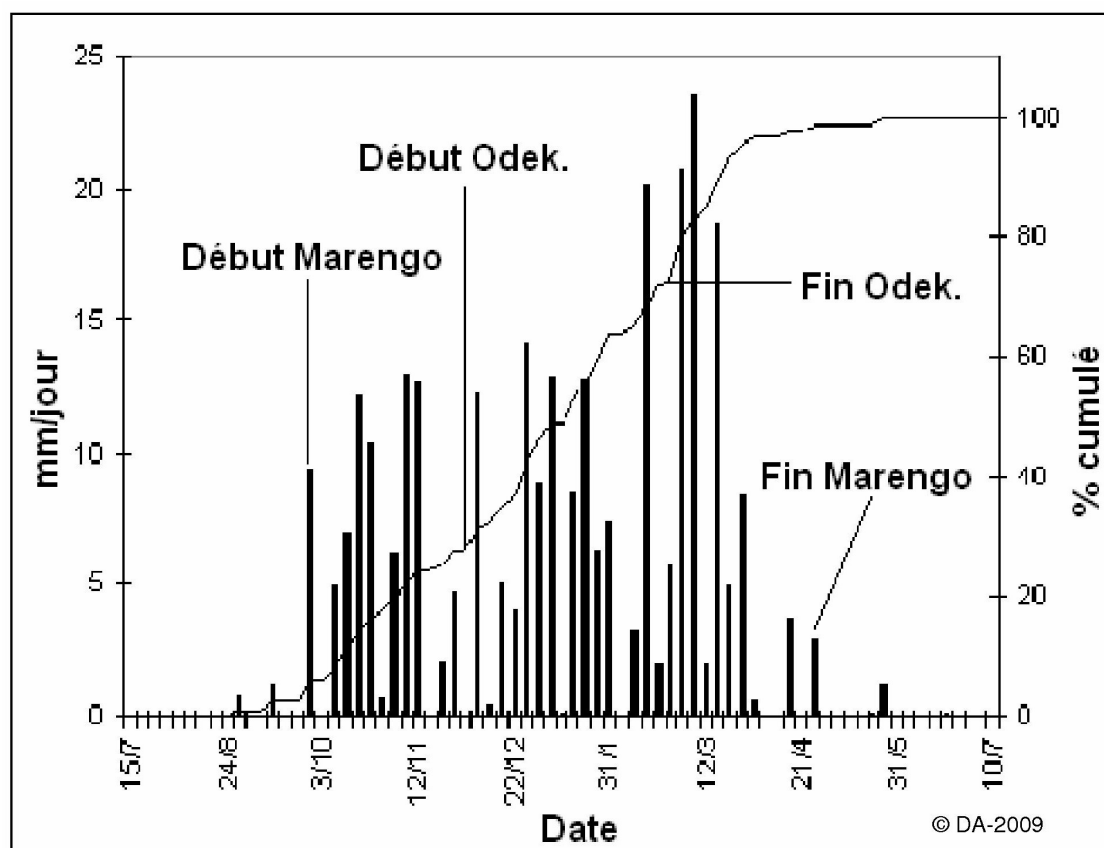


Figure 4.6 : Présentation des méthodes proposées par Marengo *et al.* (2001) et Odekunle (2006) pour détecter les dates de début et de fin des pluies.

Enfin, Liebmann (2006) et Liebmann *et al.* (2007) proposent une méthode basée sur la définition d'un indice appelé « *Anomalous Accumulation* » (AA) qui consiste à calculer la différence entre l'accumulation de précipitations journalières et une accumulation théorique moyenne pendant laquelle il précipiterait quotidiennement le taux journalier moyen, et où :

$$AA(t) = \sum_{n=1}^t R(n) - \bar{R} \times t$$

AA(t) représente l'*Anomalous Accumulation* au jour t, \bar{R} étant la moyenne de précipitations journalières (calculé par Liebmann comme étant le ratio entre le cumul annuel de précipitations et le nombre de jours dans l'année) et $R(n)$ les précipitations au jour n. Le début (*fin*) de la saison des pluies est alors déterminé par la date où la valeur AA est minimale (*maximale*).

Dans cette étude, la méthode de Liebmann est retenue car elle présente plusieurs avantages : *i*) elle permet de s'affranchir des faux démarrages de la saison pluvieuse ; *ii*) elle permet de toujours définir les dates de début et fin de saison des pluies, ce qui n'est pas vrai par la méthode de Marengo *et al.* (2001) ; *iii*) elle est relativement simple et facile à programmer.

Cependant, l'application de cette méthode est réadaptée en fixant un seuil pertinent par rapport au climat régional étudié, au sujet analysé (la culture du soja) et à l'échelle spatiotemporelle considérée. Ainsi, un seuil ayant un lien avec les besoins en eau du soja est

déterminé. Selon Rosolem (2006), en phase de semis et d'émergence, le soja a besoin de 2,2 mm d'eau par jour. Cependant, le même auteur précise qu'une fois cette phase passée (7 jours plus tard environ), les besoins passent à 5,1 mm/jour, soit plus du double. Dans cette étude, ces deux seuils sont considérés (fig. 4.7). Cependant, le seuil de 5,1 mm/jour étant le plus contraignant pour la culture du soja, il est pris en exemple pour illustrer la variabilité spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso. Le seuil de 2,2 mm/jour sera utilisé au chapitre suivant dans le but de mettre en avant la vulnérabilité des cultures de soja dans le cas de situations de semis précoces.

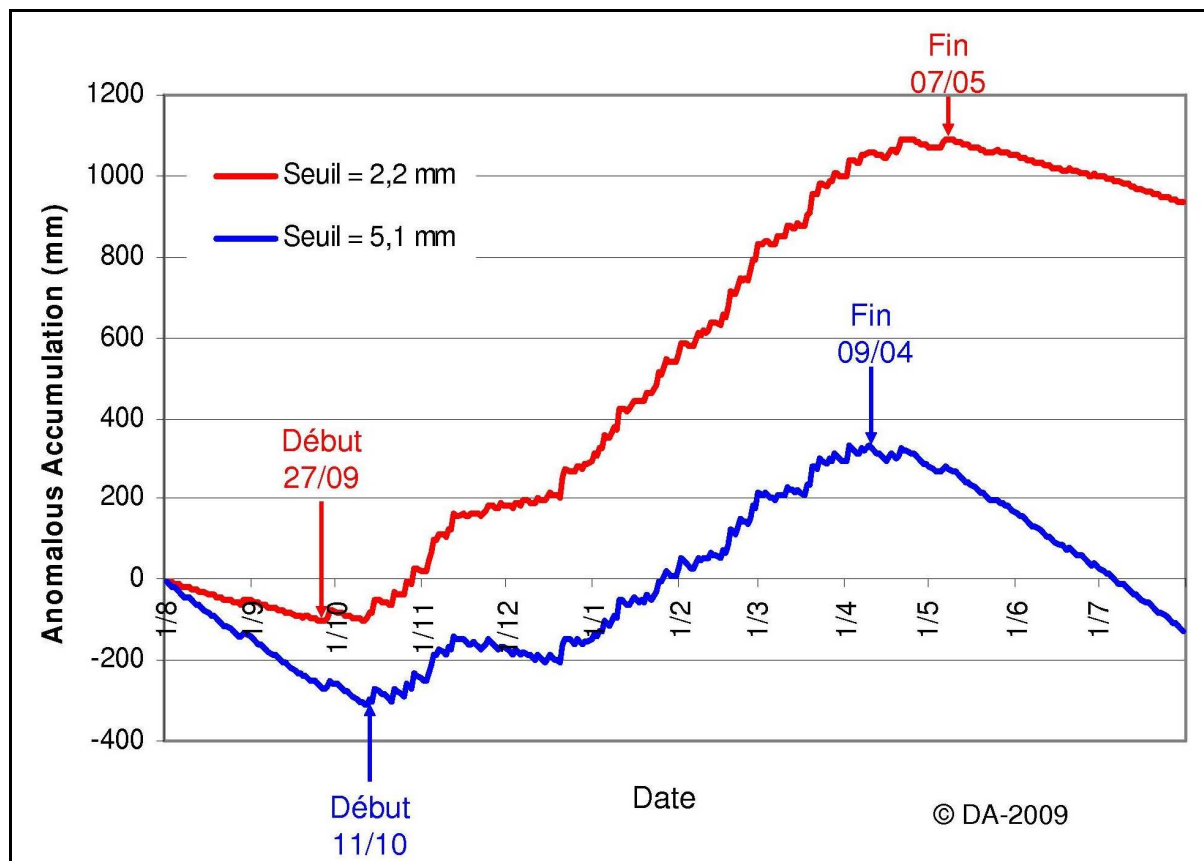


Figure 4.7 : Calcul des dates de début et fin des pluies pour l'année 2004-2005 pour la station de Sorriso avec deux seuils de précipitations journalières (2,2 mm/jour et 5,1 mm/jour).

4.3. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso

4.3.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels

Au-delà des cartes de synthèses mensuelles, le fait de disposer de données complètes et homogènes d'observations TRMM 3B42 permet d'envisager l'étude des modes de variabilité interannuelle des régimes mensuels au moyen d'une ACP. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse de données descriptive qui a pour objectif la réorganisation de grands tableaux de données et la hiérarchisation de l'information. L'entrée privilégiée des tableaux par les variables permet leur association et la définition de nouvelles variables synthétiques ou facteurs, indépendants entre eux, et qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Ici une ACP sans rotation a été appliquée sur les données mensuelles brutes fournies par les produits TRMM 3B42 entre 1998 et 2007.

4.3.2. Variabilité de la temporalité de la saison des pluies

A partir des paramètres de la saison des pluies précédemment présentés, il est également possible d'analyser la variabilité spatiotemporelle des dates et durée caractéristiques de la saison des pluies. Ces paramètres sont importants à calculer afin d'être mis en relation avec les pratiques agricoles des différentes régions de production du soja au Mato Grosso (chapitres 2 et 3). L'objectif est de déterminer les différences de dates de début et fin de saison des pluies et de sa durée entre les divers pôles de production pour tenter de mieux comprendre la diversité des calendriers agricoles. Par ailleurs, la variabilité temporelle des dates de début des pluies est étudiée à partir des extrêmes sur les sept années de l'étude (saisons 1998-99 à 2006-07).

5. Résultats : Variabilité spatiotemporelle des caractéristiques de la saison des pluies au Mato Grosso

5.1. Validation des produits 3B42

Pour valider la qualité des données TRMM 3B42, celles-ci sont comparées aux mesures faites au sol par 116 stations météorologiques réparties sur tout le Mato Grosso. Le tableau 4.4 présente les résultats des critères statistiques définis par Laurent *et al.* (1998) et obtenus pour différents pas de temps. La qualité des corrélations ainsi que les autres critères tels que l'indice de Nash ou le RMSE se dégradent régulièrement à mesure que le pas de temps considéré est petit. A intervalles de 10 et 5 jours, les résultats restent encore significatifs ($R_{10} = 0,77$ et $R_5 = 0,66$; $I_{10} = 0,56$ et $I_5 = 0,35$; $RMSE_{10} = 34,45$ et $RMSE_5 = 25,36$)¹. Par contre, au pas de temps journalier, les résultats ne sont plus acceptables et interdisent donc l'utilisation de ces données. L'indice de Nash négatif ($I_1 = -0,29$) indique que l'estimation est moins bonne que la moyenne des valeurs de référence. Ainsi, lors des calculs des paramètres de la saison pluvieuse, les données pentadaires seront retenues car disposant du meilleur rapport « fiabilité - pas de temps ».

Afin de déterminer si la qualité des estimations proposées par les données TRMM 3B42 est homogène sur tout le territoire matogrossense, les coefficients de corrélation sont calculés pour chacune des 116 stations retenues et les résultats sont interpolés sur l'ensemble de l'Etat. Les cartes montrent alors que la qualité des estimations est homogène à l'échelle du Mato Grosso. En effet, les coefficients sont toujours compris entre 0,65 et 0,75, conformément à la moyenne de $R = 0,69$ obtenue en prenant en compte toutes les 116 stations. Cependant, pour quelques stations en particulier, les coefficients peuvent être supérieurs à 0,80 ou inférieurs à 0,60. Dans ce dernier cas, les coefficients de corrélation peuvent donc aider à localiser des stations mal placées ou avec des erreurs de mesures, comme le proposent Collischonn *et al.* (2006) (fig. 4.8).

¹ Les corrélations au pas de temps décadaire ($R = 0,77$) est cohérente avec les résultats obtenus par Bigot (2004) en Côte d'Ivoire ($R = 0,8$).

Pixel = 0,25° x 0,25°		Critère statistique			
		Coefficient de corrélation	Biais	RMSE	Indice de Nash
Pas de temps	30 jours	0.89	10.63	72.89	0.67
	10 jours	0.77	3.65	34.45	0.56
	5 jours	0.66	1.80	25.36	0.35
	1 jour	0.28	0.35	13.10	-0.29

Tableau 4.4 : Critères statistiques (coefficient de corrélation, biais, RMSE et indice de Nash) calculés entre les estimations TRMM 3B42 et les données de 116 stations pour différents pas de temps et différentes résolutions spatiales.

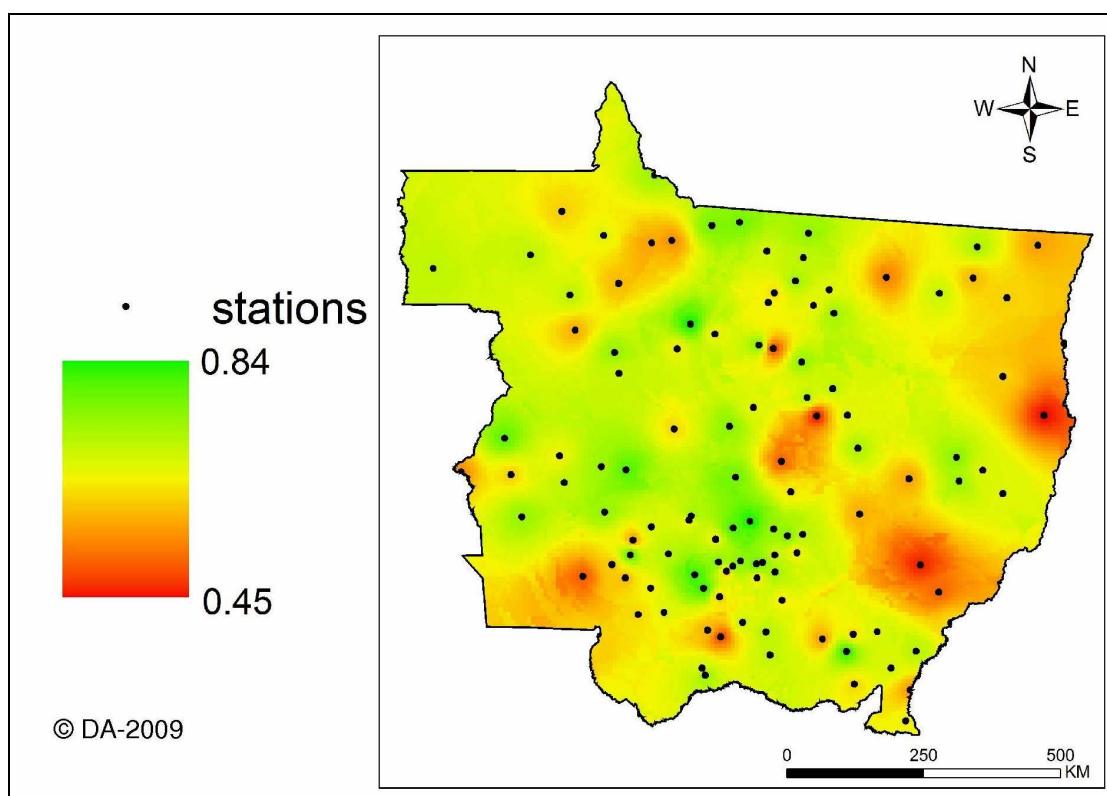


Figure 4.8 : Coefficients de corrélation obtenus pour les 116 stations prises en compte en 2004-2005 et interpolés sur le Mato Grosso.

La validation est complétée par l'analyse des critères proposés par Su *et al.* (2008) qui permettent d'évaluer le potentiel des produits TRMM 3B42 pour la détection d'événements pluvieux (tableau 4.5). Il apparaît que pour les seuils bas, les données satellitaires ont tendance à surestimer les événements pluvieux comme l'indique le FBI supérieur à 1. Ce critère est seulement inférieur à 1 pour un seuil de 20 mm. Ainsi, les données TRMM surestiment les faibles événements pluvieux et sous-estiment les fortes précipitations. Ces résultats sont confirmés par les indices FAR et POD pour un seuil de précipitations bas (0,1 mm par exemple). Le FAR indique que 53% des jours pluvieux détectés par les estimations ne sont pas mesurés par les stations. Au contraire, 76% des événements pluvieux mesurés au sol ont été détectés par les estimations. Pour un seuil de précipitations élevé (20 mm), le FAR est de 76% indiquant que la grande majorité des fortes précipitations détectées par TRMM ne se vérifie pas sur le terrain. Le POD confirme cette information puisque seulement 22% des

fortes pluies mesurées au sol sont également perçues par le satellite. Enfin, le ETS est faible (entre 0,23 et 0,09) pour tous les seuils utilisés ce qui illustre les limitations des estimations pour détecter les événements pluvieux. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Su *et al.* (2008) sur la partie nord du bassin de la Plata qui remarquent également une surestimation de la fréquence des événements pluvieux ainsi qu'une baisse du POD et du ETS et une hausse du FAR lorsque le seuil augmente. Toutefois, ceux-ci obtiennent des valeurs générales supérieures (le ETS atteint des valeurs supérieures à 0,5 pour certains bassins et certains seuils, ce qui n'est pas le cas dans notre étude).

Ces faibles résultats sont expliqués par le caractère convectif très marqué des précipitations au Mato Grosso. Les convections entraînent des précipitations localisées qui ne sont pas toujours mesurées par les stations au sol. Au contraire, les données satellites captent ces phénomènes convectifs et les moyennent sur un pixel de 0,25° ce qui augmente considérablement le nombre de jours pluvieux tout en diminuant les hauteurs précipitées. Pour pouvoir mieux prendre en compte la variabilité intra pixel des précipitations, il faudrait disposer de plusieurs stations par pixel et moyenner leurs données à la même résolution que les données TRMM... ce qui n'est pas possible au Mato Grosso.

Seuil (mm)	Résolution : 0,25°					
	0,1	0,5	1	5	10	20
FBI (idéal = 1)	1.60	1.56	1.52	1.29	1.13	0.93
FAR (idéal = 0)	0.53	0.53	0.54	0.60	0.66	0.76
POD (idéal = 1)	0.76	0.74	0.70	0.52	0.38	0.22
ETS (idéal = 1)	0.23	0.23	0.23	0.18	0.14	0.09

Tableau 4.5 : Critères statistiques (FBI, FAR, POD et ETS) calculés entre les estimations TRMM 3B42 et les données de 116 stations au pas de temps journalier pour une résolution spatiale de 0,25°.

5.2. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso

5.2.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels

La carte des précipitations annuelles (figure 4.9) met en avant le gradient N-S avec des totaux variant entre 900 mm au SE et 3000 mm au NE. Par ailleurs, il existe un gradient plus léger qui oppose l'ouest du bassin amazonien plus arrosé à l'est du bassin. La carte montre également l'impact du relief sur les totaux pluviométriques annuels : la *Serra do Cachimbo* (figure 4.1), à la frontière entre le Mato Grosso et l'Etat du Para au nord-est, reçoit en moyenne 2 à 300 millimètres de plus que la plaine voisine. Les cartes des précipitations moyennes mensuelles (figure 4.10) permettent de bien mettre en évidence l'alternance saisonnière entre la saison des pluies (de novembre à mars) et la saison sèche (d'avril à septembre), ainsi que le fort gradient sud-nord : la saison sèche diminue ainsi du sud et de l'est (5 à 6 mois) vers le nord de l'Etat (2 à 3 mois).

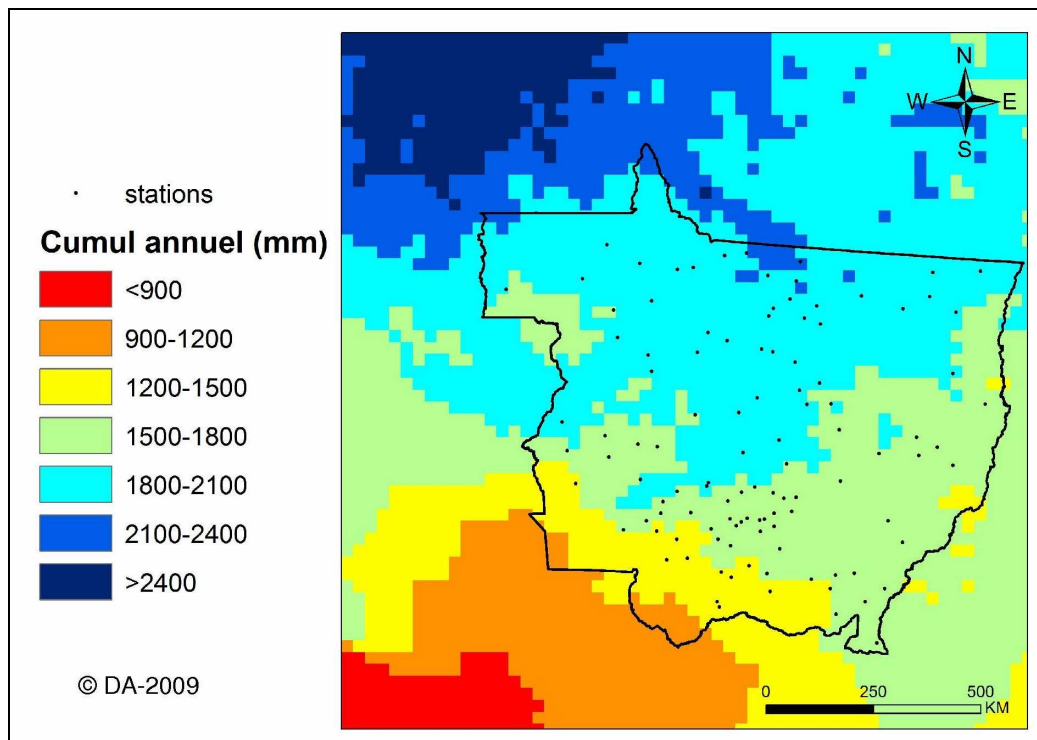


Figure 4.9 : Précipitations annuelles moyennes (1998-2007) calculées à partir des données TRMM 3B42 (en mm). Les 116 stations employées pour valider la qualité des données TRMM 3B42 sont également indiquées.

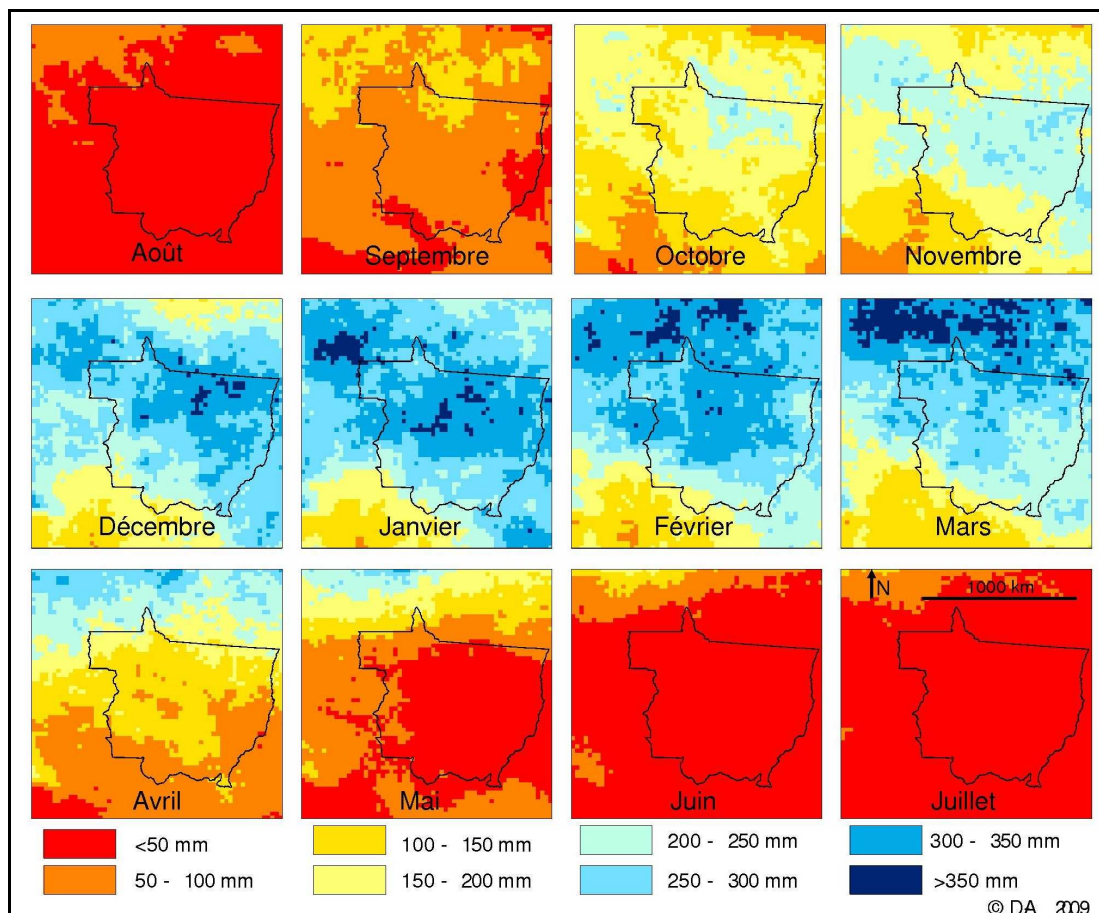


Figure 4.10 : Précipitations moyennes mensuelles (1998-2007) estimées par TRMM 3B42.

Les synthèses TRMM 3B42 servent aussi de données d'entrée pour une Analyse en Composantes Principales sans rotation sur les données mensuelles brutes de la période 1998-2006. Elle permet d'obtenir les composantes spatiales et temporelles des principaux modes de la variabilité des précipitations mensuelles (figure 4.11). Les résultats montrent que les deux premières composantes expliquent une part importante (plus de la moitié) de la variance totale, avec 37,7% pour le premier axe et 15,1% pour le second. Le troisième axe quant à lui représente 6,2% de la variance totale.

La première composante correspond à un effet de masse et oppose les fortes précipitations du nord du Mato Grosso au sud-ouest où il pleut peu (figure 4a): cette figure ressemble donc beaucoup à la carte de la figure 2. La composante temporelle associée à ce premier facteur montre que l'opposition entre le nord et le sud est particulièrement marquée pendant les mois d'été austral, mais pas tous les ans ; par exemple de décembre 2004 à janvier 2005, les écarts saisonniers sont moins marqués. L'opposition entre nord et sud est atténuée pendant les mois d'hiver austral à cause des pluies frontales d'origine extra-tropicales (Garreaud, 2000 ; Seluchi et Marengo, 2000) qui, étant plus abondantes dans le sud, tendent à limiter les écarts pluviométriques avec le nord. Il arrive même qu'il pleuve plus au sud qu'au nord (août 1998) lorsque les systèmes frontaux de l'hémisphère sud sont particulièrement actifs.

La deuxième composante caractérise surtout l'est du Mato Grosso avec une saisonnalité très marquée (plus de pluie en été et moins de pluie en hiver), mais on repère des exceptions (janvier et février 2001 qui ont été plus secs que les mois de janvier moyens). Cet axe rappelle que la saisonnalité des pluies est bien plus marquée au SE qu'au SW de l'Amazonie (Ronchail *et al.*, 2002) du fait du passage des perturbations extratropicales qui pénètrent vers les basses latitudes, entre les Andes et le *Planalto* brésilien, et donnent des pluies d'hiver dans le sud-ouest. Ceci se remarque également sur les cartes de mai, juin, juillet et août de la figure 4.10.

Les résultats de la troisième composante permettent de caractériser l'ouest du Mato Grosso et l'état voisin du Rondônia qui s'opposent à l'est du Mato Grosso et au sud-est de l'état du Para. On remarque à l'ouest (est) des périodes plus pluvieuses (sèches), comme de décembre 1998 à juillet 1999, et d'autres plus sèches (pluvieuses), comme de décembre 1999 à juin 2001. La variabilité dans ce cas se décline donc à l'échelle interannuelle. Or, dans le nord du bassin amazonien et dans une partie du bassin de La Plata, cette variabilité est associée aux températures de surface océanique (TSO) des océans voisins (Aceituno, 1988 ; Marengo, 1992 ; Liebmann et Marengo, 2001 ; Ronchail *et al.*, 2002 ; Grimm, 2003 ; Grimm, 2004). Pour ces raisons, les valeurs de la composante temporelle de ce facteur ont été corrélées au Multivariate ENSO Index (Wolker, 1987) et aux TSO de l'Atlantique tropical. Mais aucun de ces indices n'explique la variabilité des pluies. Les variabilités des océans Pacifique et Atlantique modulant essentiellement la circulation de Walker d'une part et le transport de vapeur d'eau vers le Mato Grosso d'autre part, d'autres facteurs doivent être évoqués pour expliquer la variabilité des pluies décrite par l'axe 3. On peut formuler l'hypothèse du rôle de l'activité des perturbations extra-tropicales ou de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS) qui sont des mécanismes pluviogènes importants de cette région à plusieurs échelles de temps (Garreaud et Wallace, 1998 ; Seluchi et Marengo, 2000 ; Carvalho *et al.*, 2004). La vérification de cette hypothèse reste cependant à faire.

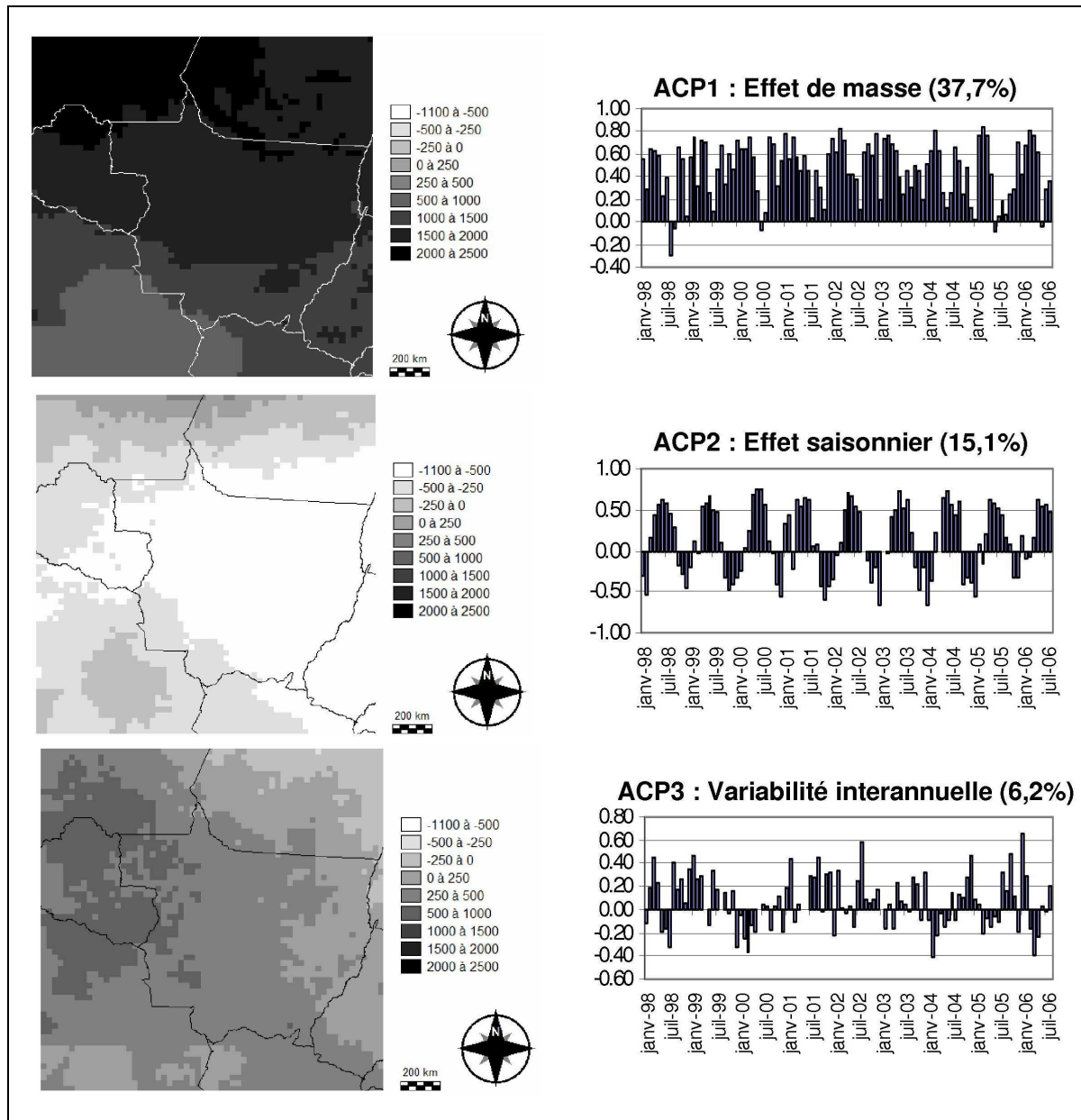


Figure 4.11 : Résultats d'une ACP sans rotation sur les totaux pluviométriques mensuels bruts TRMM (janvier 1998 à juillet 2006) : à gauche, les composantes spatiales et à droite, les chroniques des 3 premières composantes de l'ACP.

5.2.2. Variabilité de la temporalité de la saison des pluies

La méthode de Liebmann *et al.* (2007) a été appliquée sur les données d'estimation des pluies issues des produits tri-horaires TRMM 3B42. Des précipitations pentadires ont été calculées sur la période allant d'août 1998 à juillet 2007. Les deux seuils proposés auparavant (2,2 mm et 5,1 mm) ont été testés pour déterminer les attributs recherchés (début, fin et durée de la saison pluvieuse) pour les neuf années pluviométriques (seuls les résultats au seuil de 5,1 mm sont présentés).

Le début de la saison des pluies s'organise selon une orientation NW-SE (figure 4.12.A). Selon Gan *et al.* (2004), cette orientation est liée aux interactions entre la convection tropicale et les systèmes frontaux de moyenne latitude qui participent à la mise en place de la ZCAS au printemps. Sur cet axe principal, le début de la saison des pluies intervient avant le

premier novembre, ce qui le met en opposition avec le « couloir sec amazonien » au nord-est décrit par Durieux (2002). Ce couloir est situé entre deux régions de fortes précipitations localisées à l'embouchure de l'Amazone d'une part et au centre de l'Amazonie d'autre part. Le relief joue également un rôle important comme sur la Serra do Cachimbo (nord du Mato Grosso) où la saison des pluies commence avant le premier octobre.

La fin de la saison des pluies (figure 4.12.B) intervient au mois de mars sur la majeure partie centrale du Mato Grosso. Son évolution suit une orientation nord-sud plus marquée qui s'explique par le déplacement de la convection au nord en connexion avec la ZCIT (Gan *et al.*, 2004). Ce retrait régulier de la saison des pluies est simplement perturbé par quelques reliefs tels que le plateau des Parecis et le plateau des Guimarães où quelques précipitations d'automne retardent la fin de la saison pluvieuse au mois d'avril. La durée de la saison des pluies (figure 4.12.C) est donc fortement liée à la date de début des pluies comme le montre le gradient NW-SE qui se retrouve ici. Cette durée est de 4 à 5 mois sur la majeure partie de l'Etat sauf sur les reliefs comme la Serra do Cachimbo (durée de 5 à 6 mois).

Ces informations sont confirmées par la figure 4.13 qui montre que la date de début des pluies s'étend de mi-septembre au nord à fin novembre au sud, donc avec un fort gradient nord sud qui avait déjà été mentionné par Dubreuil *et al.* (2004) et qui apparaît sur les cartes précédentes. Ceci indique une arrivée progressive de la saison des pluies correspondant à une mise en place progressive de la mousson sud-américaine. Au contraire, le gradient nord / sud est moins marqué sur le profil correspondant à la fin de la saison des pluies. Celle-ci intervient vers la fin mars et traduit un retrait plus régulier de la saison des pluies. Par conséquent, la durée de la saison des pluies (de 100 à 200 jours, *i.e.* 3 à 7 mois comme présenté auparavant) est principalement déterminée par la date de début des pluies. On remarque enfin clairement un lien entre les pluies annuelles et la durée de la saison des pluies qui varient toutes deux dans le même sens ($R^2 = 0,91$ entre les précipitations annuelles et la durée de la saison des pluies).

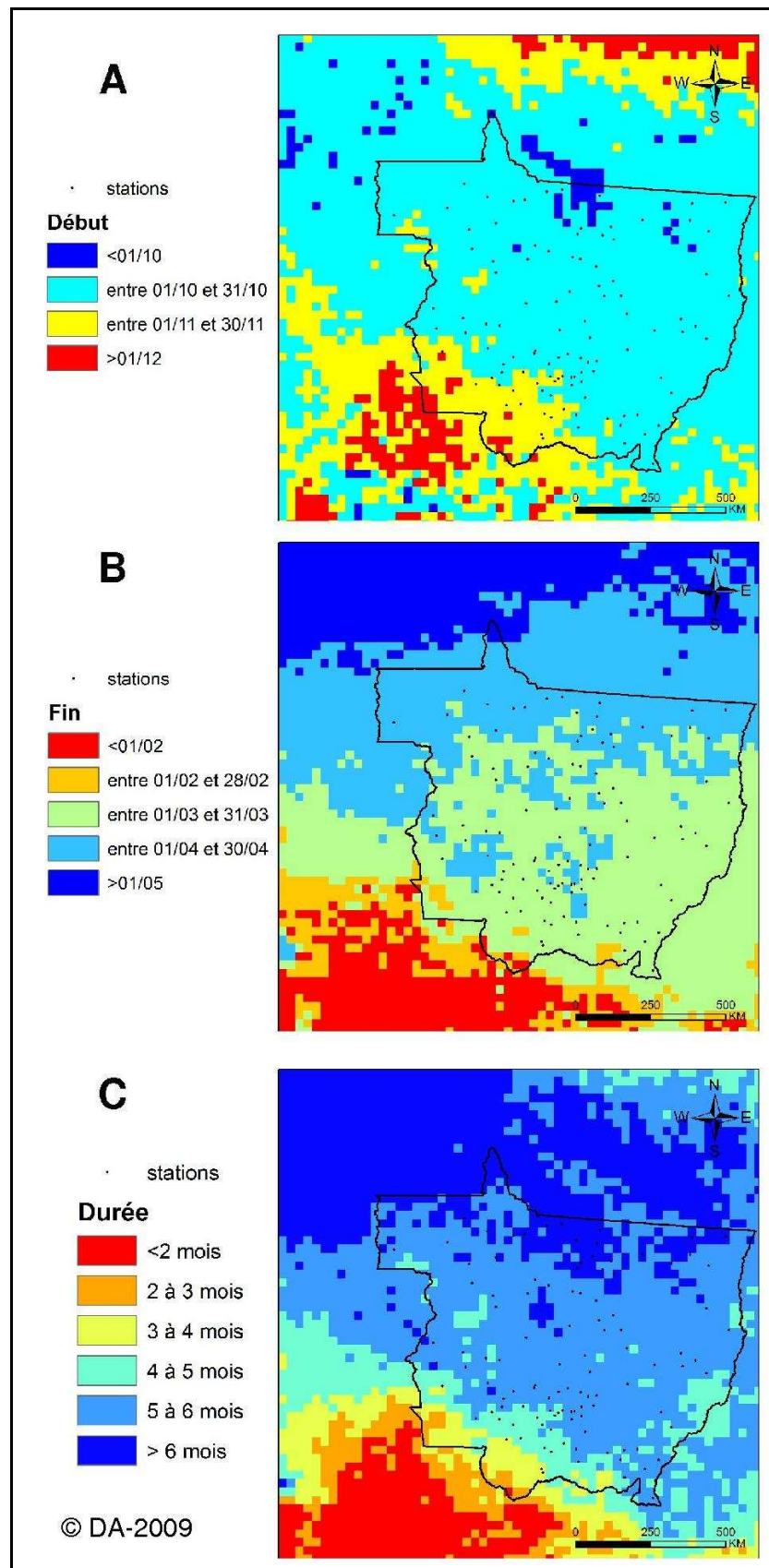


Figure 4.12 : Cartes des paramètres de la saison des pluies calculés à partir de la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann *et al.*, 2007), avec un seuil égal à 5,1mm (moyenne 1998-2007) : dates de début (A) et fin (B) de la saison des pluies, et durée de la saison des pluies (C).

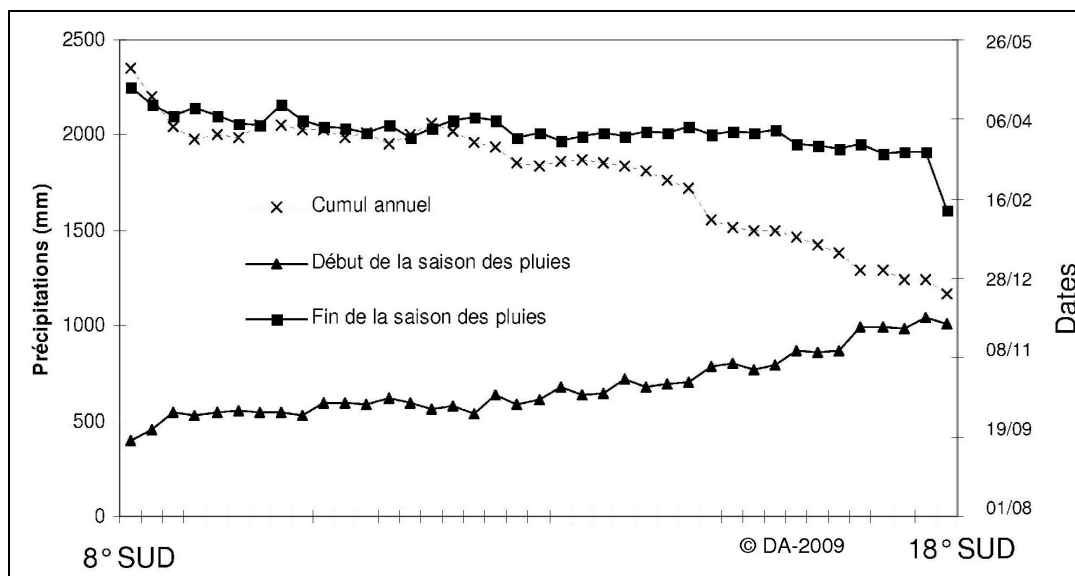


Figure 4.13 : Gradient nord/sud des paramètres de la saison des pluies calculés par la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann *et al.*, 2007) avec un seuil = 5,1mm. Les dates de début et fin de la saison des pluies sont indiquées sur l'ordonnée de droite (la durée de la saison des pluies correspond à l'espace entre les courbes de début et fin de la saison pluvieuse). En outre, les cumuls annuels de précipitation sont présentés et définis par l'axe des ordonnées de gauche.

Après avoir présenté les données moyennées sur huit ans, deux années sont choisies pour illustrer la variabilité interannuelle de la saison des pluies. En 2002-2003, la saison des pluies a été plus courte avec un début des pluies début décembre (figure 4.14.B), notamment au sud-ouest de l'Etat et dans l'Etat voisin du Para au nord-est, où apparaît le « couloir sec amazonien ». Au contraire, en 1999-2000 (figure 4.14.A), la saison des pluies a été plus longue au Mato Grosso, surtout à l'ouest, au sud-ouest ainsi qu'au nord de l'Etat. Les pluies de ces deux années ont été influencées par des phénomènes climatiques d'échelle quasi-planétaire. En effet, l'année 2002-2003 correspond à une année de type El Niño tandis que 1999-2000 est une année de type La Niña. Ronchail *et al.* (2002) expliquent que la partie sud du bassin amazonien est localisée entre deux régions (Nord de l'Amazonie et Sud Est de l'Amérique du Sud) qui sont fortement et inversement affectées par les événements El Niño. Par conséquent, ceux-ci peuvent entraîner des baisses de précipitations en saison humide (comme cela se produit au nord de l'Amazonie) et des augmentations au printemps et en hiver austral suivant (de mars à août) au sud du bassin amazonien, comme cela se produit au sud-est de l'Amérique du Sud. Ces différences saisonnières font que l'impact de l'ENSO sur les précipitations au sud du bassin est faible à l'échelle annuelle, ce qui peut expliquer pourquoi l'ENSO ne se retrouve pas dans les premières composantes de l'ACP expliquant la variabilité interannuelle. Les augmentations de précipitations en printemps-hiver suivant les épisodes El Niño sont liées à une activité extra-tropicale développée et expliquent en partie la fin tardive de la saison des pluies au Mato Grosso. Celle-ci a été estimée entre le 7 et le 11 avril 2003 pour les communes de Sorriso, Sapezal et Rondonopolis, ce qui correspond au maximum de la série de huit années. L'étude des dates de début et fin de la saison des pluies pourrait donc permettre de mieux caractériser la variabilité interannuelle liée à l'ENSO.

6. Conclusion

Etant donné le peu de données de terrain généralement disponibles aux latitudes tropicales, les estimations de précipitations par satellites s'avèrent particulièrement efficaces

pour fournir des données homogènes à l'échelle régionale. Les produits TRMM 3B42 (Tropical Rainfall Measuring Mission) sont notamment reconnus pour leur qualité liée à l'utilisation de données multi-sources (micro-ondes, infrarouge et données au sol) dans les algorithmes d'estimation. Leur emploi dans une région telle que l'Amazonie et, plus particulièrement au Mato Grosso, s'avère très intéressant. D'une part, elles permettent de spatialiser la pluviométrie de la région à partir des moyennes mensuelles sur neuf années d'étude (1998-1999 à 2006-2007) ; ces données traitées par une ACP sans rotation détectent les gradients N-S et E-O caractéristiques des précipitations au Mato Grosso. D'autre part, notre étude des paramètres de la saison pluvieuse tels que le début, la fin et la durée de la saison des pluies permet d'affiner l'analyse de la variabilité spatiotemporelle des précipitations. Les résultats indiquent que la date de début des pluies (entre fin septembre et début décembre) est plus variable que la date de fin des pluies (en mars-avril). Ceci est également rapporté par Gan *et al.* (2004) qui concluent que la date de début des pluies est dépendante de perturbations extra tropicales qui organisent la convection. En effet, l'orientation NW-SE de l'arrivée de la saison des pluies et NS du retrait des pluies indique que ces épisodes répondent à des dynamiques distinctes. Le début des pluies est lié à la mise en place de la ZCAS tandis que la fin est liée à la mise en place de l'Anticyclone Tropical Atlantique.

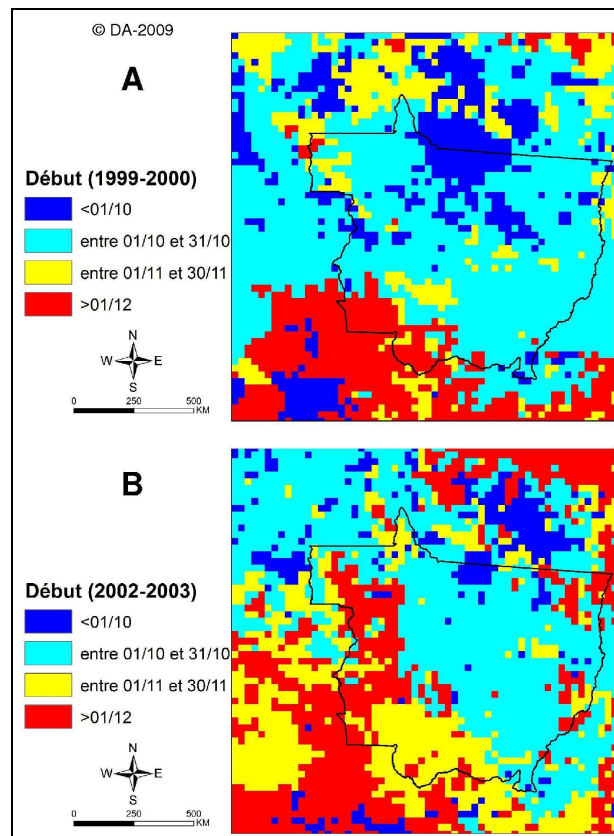


Figure 4.14 : Début des pluies calculé pour 1999-2000 (A) et 2002-2003 (B).

La forte variabilité spatiotemporelle des conditions pluviométriques influe sur les activités humaines et surtout sur le secteur agricole. Il s'agit donc à présent de déterminer si cette variabilité apporte des éléments d'aide à la compréhension de la dynamique du soja au Mato Grosso.

Chapitre 12. La pluviométrie et l'agriculture au Mato Grosso

1. Introduction

L'avancée de la frontière agricole au Mato Grosso dépend de nombreux facteurs artificiels : présence de routes, d'instituts de recherche, incitations gouvernementales, cours des produits agricoles... Mais le milieu naturel est un autre élément guidant l'avancée du front pionnier. Dans ce chapitre, nous nous intéressons notamment au rôle des précipitations sur la progression du front d'intensification agricole.

Après la mise au point par la recherche brésilienne de variétés de soja adaptées au climat tropical, la régularité des précipitations tropicales est devenue un atout permettant la croissance des cultures de soja depuis plus de 20 ans au Mato Grosso. Dans un premier temps, nous émettons donc l'hypothèse que les moyennes pluviométriques sont un facteur de l'expansion des cultures de soja au Mato Grosso. En outre, elles influent sur les pratiques culturales adoptées dans les principales régions agricoles de l'Etat et notamment sur le niveau d'intensification agricole. Les producteurs des régions les plus arrosées peuvent opter pour un système de production intensif avec deux cultures commerciales.

Cependant, les précipitations observées dans les régions tropicales sont également soumises à une forte variabilité spatio-temporelle. Cette variabilité est notamment liée à l'arrivée de la saison des pluies suite au renforcement de la ZCAS et au développement d'une forte activité convective en Amazonie. Cela se traduit par l'apparition de systèmes convectifs de méso-échelle entraînant des précipitations localisées qui sont à la base de la variabilité pluviométrique au Mato Grosso. Dans un second temps, il convient donc de déterminer si cette variabilité, combinée à une tendance à l'intensification agricole, peut être un facteur de vulnérabilité pour les producteurs de soja. En effet, intensifier la production en réalisant deux récoltes par an implique de semer de plus en plus tôt. Or, un semis trop précoce, anticipé sur le début de la saison des pluies, peut s'avérer préjudiciable pour le bon développement des cultures de soja.

2. Les données utilisées

2.1. Les cartes d'utilisation du sol et des paramètres de la saison des pluies

Dans ce chapitre, nous cherchons à évaluer comment le climat, à travers les précipitations, influe sur l'agriculture au Mato Grosso. D'une part, il s'agit de déterminer dans quelle mesure les régimes pluviométriques moyens observés dans une région agricole expliquent les pratiques culturales adoptées par les producteurs, notamment les systèmes de production à double cultures commerciales. D'autre part, il s'agit de déterminer si la variabilité pluviométrique est une source de vulnérabilité pour l'agriculture matogrossense.

Pour ce faire, les données disponibles sont les données MODIS TERRA/EVI et les données TRMM 3B42. Les données TRMM sont prétraitées afin de donner des cartes des paramètres de la saison des pluies : cumul annuel, début, fin et durée de la saison des pluies (cf Partie 4 - Chapitre 1). Les données MODIS sont quant à elles prétraitées sous forme de

classifications d'occupation et d'utilisation du sol issues des séries temporelles de EVI (cf Partie 2). Les années d'étude correspondent aux récoltes allant de 2000-2001 à 2006-2007.

2.2. Les cartes des dates de semis du soja

Afin d'analyser le lien entre les conditions pluviométriques et les pratiques culturales de manière plus approfondie, nous nous intéressons aux calendriers agricoles (dates de semis et de récolte). Il s'agit de déterminer comment les producteurs adaptent leurs calendriers agricoles en fonction des moyennes pluviométriques observées sur leur espace de production et de comprendre comment évoluent ces calendriers agricoles dans un contexte d'intensification agricole. Une attention particulière sera portée sur les dates de semis du soja.

2.2.1. La méthode de détermination des dates de semis du soja

Les données MODIS TERRA/EVI avec une résolution temporelle de 16 jours permettent de réaliser un suivi des cycles phénologiques. De nombreuses méthodes ont été proposées pour extraire des indicateurs agro-phénologiques tels que le début, la fin, la durée des cycles phénologiques ou encore la date de maturation (Curnel et Oger, 2007). Selon ces mêmes auteurs, les techniques peuvent être divisées en catégories :

- Les techniques basées sur un seuil ;
- Les techniques basées sur les dérivées ;
- Les techniques basées sur les courbes logistiques ;
- Les techniques basées sur les moyennes mobiles ;
- Les techniques basées sur les équations empiriques.

Le choix de la méthode dépend alors du type de données traitées et de la végétation étudiée.

La méthode basée sur un seuil consiste à déterminer les dates de semis (récolte) lorsque le profil temporel de EVI devient supérieur (inférieur) à un seuil (Fischer, 1994 ; Maignan *et al.*, 2008). White *et al.* (1999) rajoutent une particularité à cette méthode en l'appliquant à des profils d'indices de végétation homogénéisés. Ils recalculent alors des séries temporelles à partir de la formule :

$$EVI_{ratio} = \frac{EVI_t - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}}$$

où EVI_t est la valeur de EVI à la date t et EVI_{min} et EVI_{max} sont respectivement les valeurs minimum et maximum de EVI de la série temporelle.

Une autre méthode basée sur un seuil consiste à estimer le semis comme réalisé lorsque la différence entre deux valeurs de EVI sur une période donnée dépasse un seuil fixé au préalable (Xin *et al.*, 2002). Quelque soit la méthode employée, le seuil doit toujours être déterminé à travers différents tests.

Les techniques basées sur les dérivées détectent les dates de semis et de récolte lorsque la dérivée (d'ordre 1 ou 2) des séries temporelles atteint des points d'inflexion. Ainsi, lorsque la dérivée coupe l'axe 0, cela signifie que la série temporelle de EVI commence à croître ou à décroître (Sakamoto *et al.*, 2005 ; Curnel et Oger, 2007). Il est alors possible de faire varier la taille de la fenêtre mobile permettant de calculer la dérivée. Cette méthode a été reprise et

réadaptée par Zhang *et al.* (2003) qui ont réajusté la série temporelle de EVI à partir d'une fonction logistique prédéfinie. Pour cela, il est nécessaire de déterminer des paramètres pour chaque phase de croissance ou décroissance détectée dans le profil. Cette méthode a l'avantage d'être robuste et peut être appliquée lorsqu'il existe plusieurs cycles phénologiques au sein d'une même année (Zhang *et al.*, 2003). Cette technique basée sur des fonctions logistiques a largement été reprise par la suite, notamment pour étudier des couverts forestiers (Soudani *et al.*, 2008 ; Ahl *et al.*, 2006 ; Beck *et al.*, 2006). Elle a aussi été reprise par Wardlow *et al.* (2006) pour détecter les phases de transition phénologiques de cultures au Kansas (USA) à partir de données MODIS. Les résultats se sont avérés décevants car il existe parfois une pré-culture qui bruite la série temporelle de EVI et empêche un bon ajustement de la fonction logistique. Pour cette raison, cette méthode n'est pas testée dans le cadre de cette thèse.

La méthode basée sur les moyennes mobiles (MATS : Moving Averages Time-Series) a été proposée par Reed *et al.* (1994). Elle consiste à calculer la moyenne mobile avec un temps de décalage dans le temps (fig.4.15). Les dates de début et de fin de cycle sont déterminées lorsque la courbe originale croise la courbe de moyenne mobile décalée (Curnel et Oger, 2007). Différents tests doivent être appliqués pour déterminer la fenêtre mobile optimale à utiliser. Cette méthode a été reprise par Schwartz et Reed (1999) pour l'étude de couverts forestiers. Cependant, elle n'a pas été appliquée sur des cultures.

Les méthodes testées dans cette étude sont : la méthode MATS proposée par Reed *et al.* (1994), la méthode de dérivée employée par Moulin *et al.* (1997) et les méthodes basées sur les seuils (telles que proposées par Fischer, 1994 et par White *et al.*, 1999). Pour la méthode MATS, les tailles de fenêtres choisies pour le calcul de la moyenne mobile sont de 2 ; 3 ; 4 et 5 périodes. Dans le cas des méthodes par seuil, les seuils de EVI choisis sont de 0,4 ; 0,5 et 0,6. Ces seuils sont assez élevés pour détecter une date à mi-pente de la phase de croissance et non la date de semis exactement. En raison du fait qu'il existe parfois une pré-culture avant le semis de la culture principale (soja dans notre cas), il y a une forte variabilité de l'indice de végétation à l'époque de la date de semis qui empêche de la détecter directement. Par contre, en phase de croissance, les profils tendent à avoir une évolution plus comparable. Cette affirmation est soutenue par Bradley *et al.* (2007) qui affirment que la date de moitié du maximum de EVI est stable et cohérente pour tous les écosystèmes. En détectant alors à quelle date la série temporelle franchit un seuil élevé, on évalue la date à laquelle la plante a atteint un certain stade de croissance. Il suffit alors de retrancher (*additionner*) un biais considéré fixe pour estimer la date de semis (*récolte*) (fig. 4.15). Ce biais est mesuré lors de la validation réalisée à partir des données de terrain.

Les estimations obtenues pour les dates de semis et de récolte sont validées par les données de terrain récoltées pour l'année 2005-2006 (soit 16487 pixels pour le semis et 13979 pixels pour la récolte). Cette validation est faite à partir du calcul du coefficient de corrélation, du biais et du RMSE. Par ailleurs, certaines méthodes ne permettent pas de calculer la date de semis (*récolte*) pour tous les pixels. Par exemple, une méthode basée sur un seuil à 0,5 ne détectera pas de date de semis si le maximum de la série temporelle de EVI est inférieur à 0,5. Ce cas peut se produire dans le cas de pixels mixtes, de soja malade ou de bruits dans les données MODIS. Ainsi, le pourcentage de pixels calculés par chaque méthode est également indiqué. La meilleure méthode est finalement celle permettant d'optimiser ces différents paramètres.

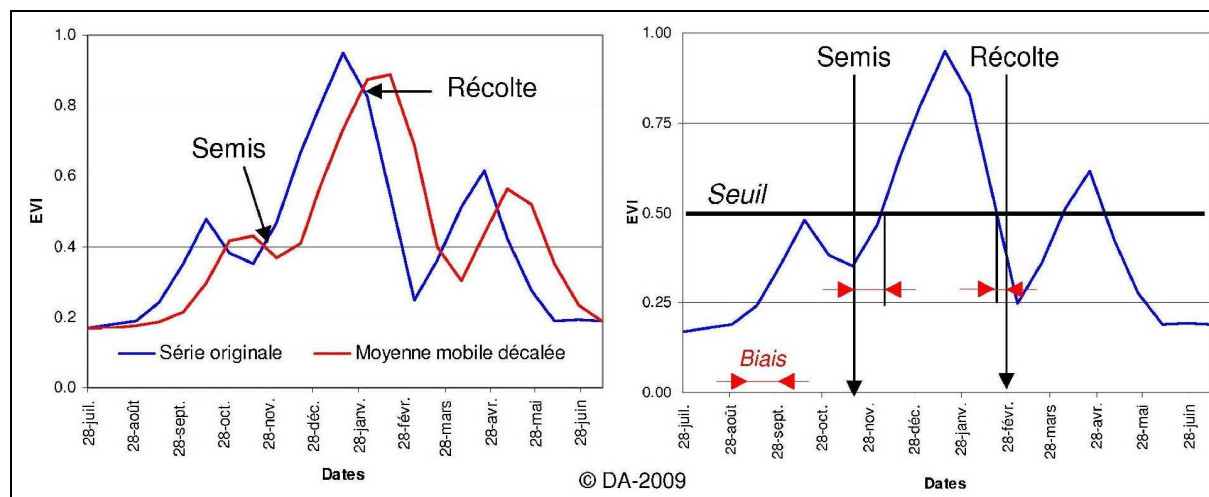


Figure 4.15 : Méthodes employées pour détecter les dates de semis et de récolte du soja au Mato Grosso à partir des séries temporelles MODIS TERRA/EVI : méthode MATS (à gauche) et méthode par seuil (à droite).

2.2.2. Validation des cartes des dates de semis du soja

Les résultats présentés dans le tableau 4.6 indiquent que les corrélations obtenues en recherchant les dates de semis sont de manière générale meilleures que celles obtenues pour la recherche des dates de récolte. La méthode proposée par Fischer (1994) avec un seuil de 0,4 donne les meilleurs résultats ($R = 0,72$ pour le semis et $R = 0,68$ pour la récolte). Il existe un fort biais (24 jours pour le semis et 19 jours pour la récolte). Intégrer ce biais dans les estimations permet d'améliorer le RMSE qui devient alors de 15 jours pour la date de semis et de 23 jours pour la date de récolte. Ces valeurs restent relativement élevées et témoignent d'une forte incertitude sur les estimations qui s'explique par la résolution temporelle des données MODIS (16 jours). Par ailleurs, il existe toujours quelques pixels isolés qui sont bruités et entraînent des incohérences dans les résultats finaux. Ces bruits peuvent être réduits en passant un filtre médian 3*3 sur les images des dates de semis et de récolte. Ce filtre permet une amélioration du coefficient de corrélation et du RMSE (pour le semis, $R = 0.74$ et $RMSE = 14.82$; pour la récolte, $R = 0.77$ et $RMSE = 20.48$) (résultats non présentés dans le tableau 4.6).¹

¹ Les résultats obtenus pour les estimations des dates de semis sont cohérents avec ceux observés par Sakamoto *et al.* (2005) pour les cultures de riz au Japon. Par contre, leurs résultats pour la détection de la date de récolte sont meilleurs. Des améliorations pourraient donc être apportées à cette méthodologie à l'avenir.

Méthode	Dates de semis					Dates de récolte				
	% de pixels calculés	R	Biais	RMSE avec biais	RMSE sans biais	% de pixels calculés	R	Biais	RMSE avec biais	RMSE sans biais
MATS-2	97.49	0.68	3	23.43	23.3	98.28	-0.23	-26.43	62.51	56.62
MATS-3	95.63	0.64	1	25.03	25.23	98.25	-0.09	-28.05	58.25	50.94
MATS-4	93.66	0.58	-1	27.14	27.08	98.1	0.14	-29.75	51.91	42.26
MATS-5	91.5	0.51	-5	29.19	28.89	98.48	0.44	-30.97	44.48	31.59
Fischer-0.3	98.64	0.41	10	25.99	24.01	99.25	0.46	-1.68	38.42	38.37
Fischer-0.4	99.16	0.72	24	28.92	15.72	98.36	0.68	-18.79	30.6	23.81
Fischer-0.5	95.91	0.75	32	35.94	14.04	97.22	0.55	-26.23	38.61	28.36
Fischer-0.6	87.06	0.78	38	43.22	12.9	93.32	0.15	-26.68	51.56	44.41
Dérivée-3	91.34	0.75	-9	21.97	19.92	99.74	-0.53	2.51	65.81	65.77
Dérivée-5	61.44	0.76	-24	30.43	19.59	97.71	-0.53	5.12	68.47	68.29
White-0.4	99.69	0.72	24	29	15.43	98.86	0.53	-22	37.71	30.34
White-0.5	98.91	0.72	30	33.66	15.02	98.74	0.62	-18	32.16	27.18
White-0.6	96.55	0.71	35	38.43	14.79	99.84	0.29	-24	46.12	39.53

Tableau 4.6 : Validation des estimations des dates de semis et de récolte à partir des séries temporelles MODIS TERRA/EVI (la ligne jaune correspond à la méthode choisie dans cette thèse).

Enfin, un inconvénient potentiel de cette méthode par seuil est son manque de robustesse. En effet, les résultats obtenus peuvent varier sensiblement selon la zone d'étude ou l'année considérée. Pour valider la méthode, des tests ont été réalisés sur une autre année (2006-2007). Il s'agit alors de déterminer si les paramètres statistiques varient fortement et ainsi de déterminer si la méthode peut être ré-appliquée sur une autre année. Les résultats obtenus pour le semis sont $R = 0,72$ et $RMSE \text{ sans biais} = 13,77$. Les résultats pour la date de récolte sont : $R = 0,51$ et $RMSE \text{ sans biais} = 28$. Ceci indique donc que la méthode est plus robuste pour déterminer la date de semis que la date de récolte. Un exemple de résultats obtenus pour des fazendas visitées à Sapezal est présenté en figure 4.16.

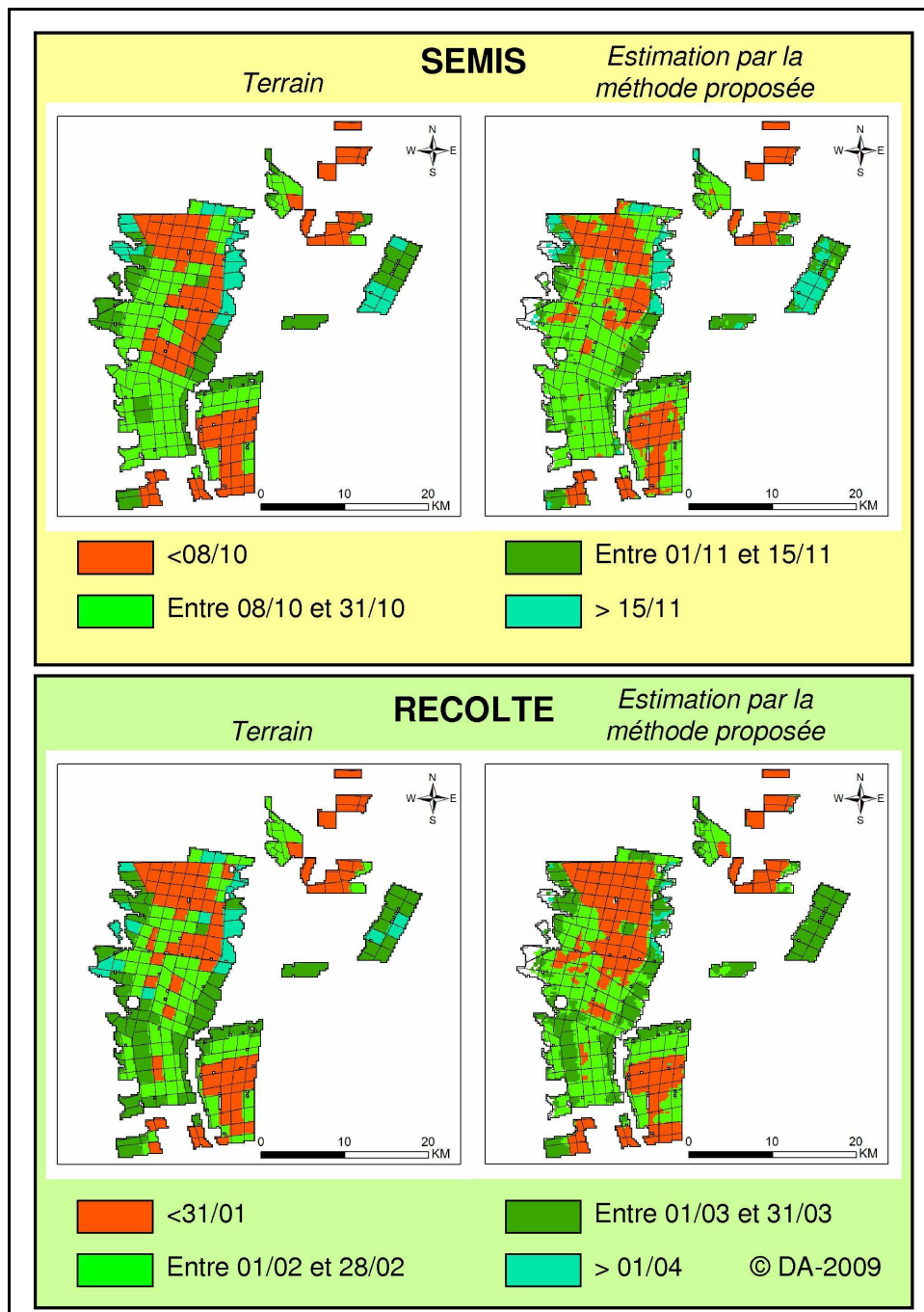


Figure 4.16 : Comparaison des estimations de dates de semis et de récoltes à partir des séries temporelles de MODIS TERRA/EVI avec les données récoltées sur le terrain, dans des fazendas situées sur la Chapada dos Parecis (Sapezal) pour la récolte 2005-2006.

3. Méthodologie pour déterminer l'influence des précipitations sur les pratiques agricoles

Les données présentées sont utilisées afin de qualifier l'influence des précipitations sur la filière agricole au Mato Grosso. L'étude se fait en deux étapes. Dans un premier temps, il s'agit de comprendre comment les moyennes pluviométriques déterminent les pratiques culturales adoptées dans les différentes régions agricoles. Dans un deuxième temps, nous cherchons à évaluer l'impact de la variabilité pluviométrique sur les cultures de soja en fonction des pratiques culturales appliquées (fig. 4.17).

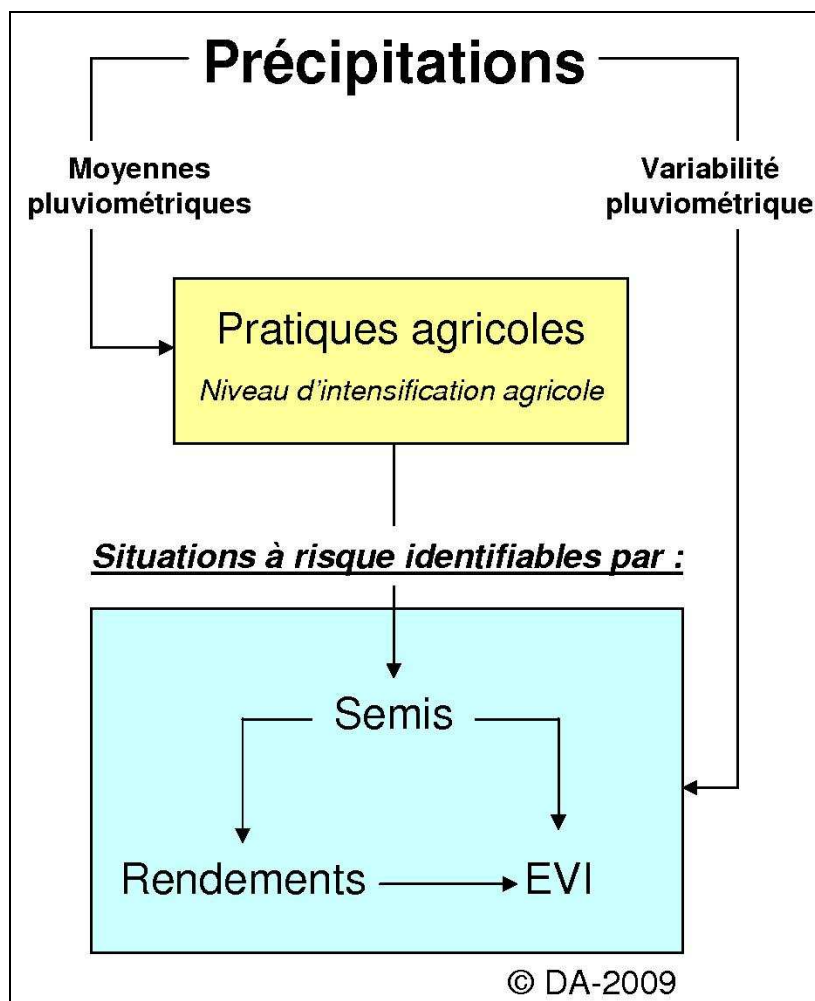


Figure 4.17 : Présentation des relations entre précipitations et pratiques agricoles au Mato Grosso.

3.1. Les moyennes pluviométriques et l'intensification agricole

L'étude s'effectue à deux échelles spatiales complémentaires : l'échelle régionale et l'échelle locale.

A l'échelle régionale, quatre communes représentatives des quatre principales régions agricoles du Mato Grosso sont prises en exemple. Il s'agit de Sapezal (région ouest), Sorriso

(région centre), Rondonopolis (région sud-est) et Canarana¹ (région est). Les paramètres définissant la saison des pluies sont mis en relation avec les pratiques agricoles de ces différentes communes. Cela permet de déterminer si les précipitations aident à mieux comprendre la diversité des calendriers agricoles et des pratiques culturales.

Pour chaque commune, un certain nombre de paramètres sont calculés tels que :

- La surface agricole ;
- Le pourcentage de la surface agricole cultivée en double cultures commerciales ;
- Les précipitations annuelles ;
- La date moyenne de début de la saison des pluies (période 1998-2007) avec un seuil à 5,1 mm/jour ;
- La durée moyenne de la saison des pluies (période 1998-2007) ;
- La date moyenne de fin de la saison des pluies (période 1998-2007) ;

Ces paramètres sont comparés avec les séries temporelles moyennes (période 2000-2001 à 2006-2007) de MODIS EVI pour ces quatre communes afin de valider le lien existant entre la saison des pluies et le calendrier agricole. De plus, la date moyenne de semis du soja dans ces communes est mesurée à partir des séries temporelles MODIS EVI.

Cette première analyse qualitative est complétée par une étude statistique à l'échelle de la localité agraire. Comme dans la Partie 3, la localité agraire est représentée par un pixel TRMM de 0,25° x 0,25°. Le but est ici de déterminer si il existe un lien statistique entre le niveau d'intensification agricole (pourcentage des surfaces agricoles semées en double cultures commerciales) et la saison des pluies.

Dans un premier temps, il convient de préciser quelles données sont utilisées pour mesurer le niveau d'intensification agricole. En effet, il est nécessaire de ne considérer que les parcelles pouvant être cultivées de manière intensive pour ne pas fausser la relation recherchée. Une parcelle nouvellement mise en culture ne peut pas être directement cultivée en système de production en double cultures commerciales car il faut un certain temps pour préparer les sols. Notamment, pour les parcelles défrichées à des fins agricoles, le soja n'est semé qu'au bout d'un à deux ans après le déboisement. Il faut alors compter encore un à deux ans avant de pouvoir semer deux cultures en succession. Ainsi, nous ne considérons que les parcelles cultivées en 2006-2007 et étant cultivées depuis au moins quatre ans (année 2002-2003). Par ailleurs, seules les cellules de 0,25° dont plus de 1% de la surface totale est cultivée sont conservées afin d'éliminer toute perturbation liée à la prise en compte de pixels non agricoles.

Ces données d'intensification agricole sont finalement employées pour mettre en avant une éventuelle dépendance avec les paramètres de la saison des pluies calculés pour les localités correspondantes. Pour cela, nous calculons les coefficients de corrélation et de détermination entre les variables considérées. Ces coefficients permettent de déterminer l'importance d'un lien entre deux variables continues quantitatives (par exemple, le niveau d'intensification agricole au sein d'un pixel et la moyenne des précipitations annuelles). Ils permettent d'estimer le pourcentage de la variance du niveau d'intensification agricole

¹ Bien que la commune de Querencia soit la plus représentative du secteur agricole dans la région, la commune voisine de Canarana a été préférée pour l'étude du climat dans cette région agricole. Ce choix est dû au fait que Querencia couvre une superficie très grande qui s'étend jusqu'au fleuve Xingu. Le territoire municipal est donc couvert par une forte proportion de forêt. Pour ces raisons, les moyennes pluviométriques mesurées à l'échelle de la commune sont faussées car il existe déjà une variabilité spatiale des précipitations à l'échelle communale.

expliqué par les paramètres de la saison des pluies analysés séparément. Une régression multiple est également effectuée pour évaluer dans quelle mesure l'ensemble de ces paramètres pluviométriques explique l'intensification agricole.

Cependant, la pluviométrie n'est pas le seul facteur expliquant l'adoption de pratiques agricoles intensives. La taille et l'ancienneté des fazendas, le potentiel d'investissement et l'origine des producteurs, la présence d'institut de recherche, entre autres, influent également sur le niveau d'intensification agricole. Dès lors, on peut s'attendre à ce que la relation entre les paramètres pluviométriques et le niveau d'intensification agricole ne soit pas parfaitement linéaire et donc à des corrélations relativement faibles. Dans ce cas, il est préférable de discrétiser les variables en classes afin de mieux faire ressortir les tendances générales et d'éliminer le bruit lié aux autres facteurs que les précipitations. Dans un premier temps, les variables pluviométriques sont donc discrétisées et le niveau d'intensification agricole est mesuré pour chacune des classes créées. Cela revient en fait à calculer la probabilité qu'une parcelle soit cultivée de manière intensive en fonction des observations pluviométriques effectuées dans cette parcelle¹. Dans un deuxième temps, la discrétisation en classes permet d'appliquer un test du Chi-2 pour mettre statistiquement en évidence une dépendance entre les deux variables. À partir d'un tableau de contingence recensant le nombre de pixels appartenant à chaque classe, le test du Chi-2 indique si la répartition des pixels s'éloigne d'une situation d'indépendance théorique.

3.2. La variabilité pluviométrique et l'intensification agricole

Une fois démontré le rôle des moyennes pluviométriques dans l'adoption des pratiques culturales, nous cherchons à évaluer l'impact de la variabilité pluviométrique sur les cultures de soja. Les conclusions tirées par Brahmananda Rao *et al.* (1997) à propos de la culture du maïs dans le Nordeste brésilien peuvent être reprises pour définir la complexité de la vulnérabilité des cultures de soja face à la variabilité pluviométrique : « *it should be pointed out that crop yields depend not only on the quantities of rainfall but on its time and spatial distribution. Sometimes a 30% decrease in rainfall combined with fairly good distribution can result in a 'normal' year of agricultural production. On the other hand there may be years with 'normal' rainfall that is poorly distributed which may produce much less crop yields* ».

Ainsi, la variabilité spatio-temporelle des précipitations doit être définie à partir de tous les paramètres de la saison des pluies. Toutefois, dans cette étude, nous ciblons l'analyse sur la variabilité de la date de début des pluies qui, combinée à une tendance à l'intensification agricole se traduisant par un changement dans les dates de semis, s'avère être un indicateur de la vulnérabilité du soja aux aléas climatiques.

3.2.1. La variabilité pluviométrique interannuelle au Mato Grosso

Les quatre communes agricoles prises en exemple pour étudier les moyennes pluviométriques (Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana) sont reprises. Pour chacune de ces communes, nous calculons la variabilité des principaux paramètres de la saison des pluies : cumul annuel de précipitations, date de début de la saison pluvieuse, date de fin de la saison pluvieuse et durée de la saison pluvieuse. La variabilité d'un paramètre est calculée en soustrayant les extrêmes (maximum moins minimum) des neuf années de l'étude (années

¹ Méthode inspirée de Seo et Mendelsohn (2008) qui mesure la probabilité que les producteurs sud-américains sèment telle ou telle culture en fonction de la température moyenne annuelle.

1998-99 à 2006-07). Dans le cas du cumul annuel de précipitations, le coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la moyenne) est également calculé pour normaliser les données.

De plus, selon Rosolem (2006), le soja a besoin de 2,2 mm d'eau par jour pendant la phase d'émergence qui dure environ sept jours. Au stade suivant, ses besoins en eau augmentent à 5,1 mm/jour. Ainsi, si la période entre la date de semis et le début des pluies est trop importante, le soja peut être affecté par un stress hydrique qui fait chuter les rendements. Pour ces raisons, nous calculons le nombre de jours moyens entre le début de la saison des pluies avec un seuil à 2,2 mm/jour et un seuil à 5,1 mm/jour. Etant donné que les producteurs de soja cherchent généralement à semer le soja dès l'apparition des premières précipitations, nous considérons que ce paramètre peut être un indicateur de la vulnérabilité des cultures du soja face à une période sèche en période de semis-émergence.

3.2.2. Indicateurs permettant de caractériser la vulnérabilité des productions de soja face aux conditions pluviométriques

L'intensification agricole observée depuis plus de dix ans s'est traduite par une avancée des dates de semis pour réaliser deux récoltes. Cependant, le début des pluies ne connaît pas de tendance particulière. Dès lors, la variabilité pluviométrique peut représenter une source de vulnérabilité pour les producteurs de soja dans la mesure où ceux-ci peuvent être amenés à semer de manière non optimale, ce qui peut se traduire par des chutes de rendements.

Pour démontrer cette hypothèse, nous cherchons dans un premier temps à prouver qu'il existe un lien entre l'adoption de pratiques agricoles intensives et les rendements. Nous démontrons également que les données MODIS TERRA/EVI représentent un outil intéressant pour le suivi de cette relation.

Ainsi, quatre relations sont analysées à l'échelle locale, i.e. à l'échelle de la parcelle lorsque les données de terrain sont disponibles ou à l'échelle de la cellule de 0,25° :

3.2.2.1. La dépendance entre les dates de semis et le niveau d'intensification agricole

Il s'agit de démontrer que la tendance à l'intensification agricole force les producteurs à semer de plus en plus tôt. Cette relation est déterminée en mesurant la date moyenne de semis pour chaque classe d'utilisation du sol issue de la classification des séries temporelles de EVI de l'année 2006-2007 (cf Partie 2). Les dates de semis sont estimées à partir de la méthodologie présentée dans ce chapitre. Cette relation permet d'établir si il existe un lien qualitatif entre les deux variables. Ce lien est ensuite validé statistiquement par un test de Chi-2 entre le niveau d'intensification agricole (rapport entre les surfaces cultivées en double cultures commerciales et les surfaces agricoles totales) au sein d'une cellule de 0,25 x 0,25° et les dates de semis du soja au sein de cette cellule. Pour cela les deux variables sont discrétisées.

3.2.2.2. La dépendance entre les dates de semis et les rendements

En démontrant que les rendements sont dépendants des dates de semis, il est possible d'émettre l'hypothèse que tout changement de pratiques culturales incluant des bouleversements dans les dates de semis peut affecter les rendements. Pour établir cette relation, nous disposons de données de rendements et des dates de semis du soja de 928

parcelles ayant été renseignées au moins une fois entre les récoltes 2003-2004 et 2006-2007. Ces parcelles font partie de fazendas localisées dans la région centre et dans la Chapada dos Parecis.

La relation entre les deux variables est analysée par deux graphes, l'un présentant l'évolution des rendements en fonction de la date de semis et l'autre présentant la probabilité d'obtenir des rendements mauvais (<45 sacs/ha), moyens (entre 45 et 60 sacs/ha) et bons (>60 sacs/ha) en fonction de la date de semis (Ortiz-Monasteiro et Lobell, 2007). Ces graphes permettent alors de valider les recommandations faites par la Fundação-MT qui conseille de semer entre le 8 octobre et le 15 novembre pour obtenir des rendements satisfaisants. En outre, après discrétisation des variables, un test de Chi-2 est appliqué pour déterminer si il existe une dépendance entre les variables.

3.2.2.3. La dépendance entre les valeurs de EVI et les dates de semis

L'objectif est ici de déterminer un indicateur objectif et exhaustif permettant d'analyser la relation de dépendance entre les dates de semis et les rendements. Le EVI, établi à partir de données satellitaires, est un indicateur répondant à ces critères puisqu'il a déjà été démontré que les indices de végétation pouvaient être utilisés pour estimer les rendements (Fontana *et al.*, 2002 ; Prasad *et al.*, 2006 ; Doraiswamy *et al.*, 2003 ; Doraiswamy *et al.*, 2007b ; Ren *et al.*, 2008). Ici, le but n'est pas d'estimer les rendements mais de déterminer un indicateur simple. Cet indicateur est choisi arbitrairement¹ comme étant la valeur maximale de EVI observée pendant le cycle du soja.

La moyenne des valeurs maximales de EVI est calculée pour chacune des 1319 parcelles pour lesquelles nous disposons des informations sur les dates de semis appliquées entre les récoltes 2003-2004 et 2006-2007. Deux graphes présentent alors : (i) l'évolution des valeurs de EVI en fonction des dates de semis et (ii) la probabilité d'obtenir des valeurs maximales de EVI faibles (inférieures au premier quartile), moyennes (entre les premiers et troisièmes quartiles) ou hautes (supérieures au troisième quartile) en fonction de la date de semis. Enfin, un test de Chi-2 est appliqué afin de valider statistiquement une éventuelle dépendance entre ces variables.

3.2.2.4. La dépendance entre les valeurs de EVI et les rendements

Finalement, il convient de valider la qualité du maximum de EVI en tant qu'indicateur des rendements. Pour cela, les rendements de 2437 parcelles renseignées par les producteurs pour les récoltes comprises entre 2003-2004 et 2006-2007 sont reclassés (<45 sacs/ha, 45-50, 50-55, 55-60, 60-65, et > 65 sacs/ha). Les séries temporelles de EVI de chaque classe de rendement sont alors présentées pour évaluer si il existe un lien qualitatif entre les deux variables. L'étude de cette relation est affinée en moyennant les valeurs maximales de EVI en fonction des classes de rendements. Enfin, le lien est validé statistiquement à l'aide d'un test de Chi-2 d'indépendance.

3.2.3. La détection de situations de semis à risques

La mise en relation de ces trois variables (dates de semis, rendements et EVI) incite à émettre l'hypothèse que l'intensification agricole, se traduisant par un changement dans les

¹ Des études plus approfondies devraient être menées pour évaluer si d'autres indicateurs (l'amplitude par exemple) peuvent s'avérer plus performants.

dates de semis, pourrait accroître la vulnérabilité des cultures de soja aux aléas climatiques. Le EVI pourrait alors être un indicateur permettant de valider l'impact réel de tels changements de pratiques culturales sur les rendements.

En comparant les dates de semis et les dates de début des pluies, il est possible de détecter les régions dans lesquelles le semis a été effectué de manière risquée. Pour cela, les estimations de précipitations à la résolution de 0,25° sont ré échantillonnées à la résolution des données MODIS afin de pouvoir croiser les informations. De plus, le ré échantillonnage intègre un algorithme de lissage bilinéaire afin de s'affranchir de l'aspect mosaïqué lié à la grande résolution spatiale des images TRMM. Finalement, quatre classes sont cartographiées :

- semis anticipé sur le début des pluies (seuil 2,2 mm/jour) : les parcelles semées avant le début des pluies avec un seuil de 2,2 mm/jour, i. e. les parcelles semées de manière anticipée et potentiellement vulnérables à des aléas climatiques (période sèche en phase de semis);
- semis anticipé sur le début des pluies (seuil 5,1 mm/jour) : les parcelles semées après le début des pluies avec un seuil de 2,2 mm/jour et avant le début des pluies avec un seuil de 5,1 mm/jour, i. e. les parcelles semées tôt dans la saison des pluies ;
- semis optimal : les parcelles semées après le début des pluies avec un seuil de 5,1 mm/jour et avant le 15 novembre, i. e. les parcelles semées de manière optimale;
- semis tardif : les parcelles semées après le 15 novembre, i.e. les parcelles semées après la période de semis conseillée par la FMT.

Les cartes de risque sont établies pour les sept récoltes de la période d'étude. Leur analyse permet d'évaluer l'évolution des situations de semis à risque au cours de la période d'étude, laquelle a d'ores et déjà été caractérisée par une forte tendance à l'intensification agricole.

4. Résultats

4.1. Les moyennes pluviométriques, des paramètres explicatifs des pratiques agricoles

Les communes de Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana sont prises en exemple (tableau 4.7) pour étudier les régimes pluviométriques dans les régions de production du soja. Les niveaux d'intensification agricole y sont très variés. Plus de 50% des surfaces agricoles sont cultivées en système de production à double cultures commerciales à Sorriso. Ce taux atteint même 86% dans la commune voisine de Lucas do Rio Verde. A Sapezal, la situation est comparable à celle de Sorriso puisque le taux d'intensification y est de 45%. Au contraire, à Rondonopolis et à Canarana, les taux sont largement inférieurs : 8% et 4% respectivement. Il s'agit donc de comprendre comment les conditions pluviométriques peuvent expliquer cette variabilité spatiale.

	Sapezal	Sorriso	Rondonopolis	Canarana
Surface cultivée totale en 2006-2007 (ha)	345050	501606	86350	66112
Surface cultivée en double cultures commerciales en 2006-2007 (ha)	156443	257106	6812	2862
Niveau d'intensification agricole en 2006-2007	45%	51%	8%	4%
Cumul annuel de précipitations (mm)	1762	1912	1521	1757
Durée de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	155	170	146	160
Début de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	23-oct.	10-oct.	27-oct.	17-oct.
Fin de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	27-mars	29-mars	22-mars	27-mars

Tableau 4.7 : Paramètres de la saison des pluies pour les quatre communes prises en exemple dans l'étude : Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana.

D'après le tableau 4.7, il apparaît que les précipitations varient selon les communes. Sorriso est la commune la plus arrosée en moyenne (1952 mm), devant Sapezal (1762 mm), Canarana (1757 mm) et Rondonopolis (1521 mm). Ces variations s'expliquent par des différences dans la temporalité de la saison pluvieuse et notamment dans les dates de début des pluies.

La saison des pluies commence plus tôt à Sorriso (10 octobre en moyenne) avant d'atteindre Canarana (17 octobre) puis Sapezal et Rondonopolis (25 et 28 octobre respectivement). Il existe donc 15 jours de différence en moyenne entre les dates de début des pluies dans les deux principales régions agricoles du Mato Grosso (région centre et région ouest). La différence entre les dates de début des pluies de deux communes situées à une même latitude (comme Sorriso et Sapezal par exemple) est principalement liée à leur position sur l'axe de la ZCAS. Sorriso se trouve directement sur l'axe des flux principaux de précipitations venant du NW et reçoit donc plus de précipitations en début de saison.

Comme cela a été analysé au chapitre précédent, le retrait de la saison des pluies s'organise de manière plus rapide, selon un axe nord-sud. Ce paramètre connaît donc une plus faible variabilité spatiale. La fin des précipitations intervient entre le 22 (Rondonopolis) et le 29 mars (Sorriso) sur toutes les régions agricoles de l'Etat. Dès lors, c'est bien la date de début des pluies qui détermine la durée de la saison des pluies, laquelle est donc plus longue à Sorriso (170 jours) que dans les autres communes (146 jours à Rondonopolis).

Par conséquent, ces paramètres influent sur les calendriers agricoles adoptés dans les principales régions agricoles du Mato Grosso. Parmi les quatre communes prises en exemple, les producteurs de Sorriso sont les premiers à semer le soja, aux alentours du 25 octobre (moyenne réalisée à partir des données MODIS de 2000-2001 à 2006-2007), afin de pouvoir réaliser une deuxième récolte. A l'échelle du Mato Grosso, c'est à Lucas do Rio Verde qu'on sème le plus tôt : le 14 octobre en moyenne. Par contre, les producteurs des régions de Sapezal (1^{er} novembre) et Rondonopolis (11 novembre) sèment plus tardivement. D'une manière générale, il existe donc une différence de 15 à 25 jours entre les dates de semis appliquées dans la région centre et dans les autres régions agricoles. Or, étant donné que le cycle du soja varie entre 90 et 130 jours environ selon les variétés et les régions de production,

un tel écart implique des possibilités d'adoption de pratiques culturelles très différentes selon les régions considérées.

Par ailleurs, les résultats montrent que les dates moyennes de semis interviennent une semaine à 10 jours après le début des pluies, ce qui indique que les producteurs maîtrisent bien leur calendrier agricole en fonction des précipitations.

A Canarana et dans la région Est dans son ensemble, la situation est légèrement différente. Les paramètres de la saison des pluies se rapprochent de ceux observés à Sorriso et sont donc propices à la pratique d'une agriculture intensive avec le semis de deux cultures successives. Pourtant, le niveau d'intensification agricole est le plus faible rencontré au Mato Grosso (4%). Ceci s'explique surtout par le fait que cette région agricole se soit développée plus récemment. En effet, sur les 66000 hectares recensés à Canarana en 2006-2007, seulement 3300 hectares étaient déjà en culture quatre ans auparavant (récolte 2002-2003). Il y a donc eu de nombreux changements d'occupation du sol dans cette région au cours des dernières années et les sols ne sont pas encore prêts à supporter deux récoltes annuelles. Pour le moment, les producteurs misent donc sur une seule culture de soja, semée plus tardivement (9 novembre en moyenne) pour ne pas prendre de risque de pertes de rendements dues à des périodes sèches en phase végétative. Cependant, les résultats observés indiquent que cette région possède un potentiel intéressant pour devenir une zone de production agricole intensive à l'avenir. Il serait toutefois nécessaire de réaliser un travail de terrain plus approfondi dans cette région pour confirmer ces résultats.

D'après ce qui a été vu à l'échelle régionale, l'adoption de pratiques agricoles intensives dépend en partie des conditions pluviométriques rencontrées sur le territoire communal. Nous cherchons à présent à valider statistiquement ces premières conclusions à l'échelle locale (cellule de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$).

D'après les résultats du tableau 4.8, les précipitations annuelles expliquent 29% de la variabilité spatiale du niveau d'intensification agricole. C'est ce paramètre qui est le mieux corrélé avec l'adoption de pratiques culturelles intensives. La date de début des pluies est négativement corrélée avec le niveau d'intensification. Ceci indique que plus la date de début des pluies est précoce, plus le système de production agricole est intensif. La date de début de la saison des pluies et la durée de la saison des pluies expliquent 22% et 24% de la variabilité du niveau d'intensification agricole. Ces résultats proches sont liés au fait que la durée de la saison des pluies est fortement dépendante de la date de début des pluies. Au contraire, la date de fin de la saison des pluies est le paramètre le moins influent sur le pourcentage d'intensification agricole. Ceci s'explique par le fait que la fin des pluies intervient de manière plus homogène sur tout le territoire matogrossense.

D'une manière générale, les résultats obtenus entre le niveau d'intensification agricole et les paramètres pluviométriques sont relativement faibles. Une régression multiple confirme ce point puisque la pluviométrie n'explique que 33% de la variabilité du niveau d'intensification agricole. Ces résultats faibles sont en partie liés au fait qu'il existe une forte hétérogénéité de l'occupation du sol au sein des cellules de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Cependant, tous les résultats obtenus sont très significatifs avec une marge d'erreur inférieure à 0,01% et valident donc l'existence d'un lien entre les conditions climatiques et les pratiques culturelles à l'échelle locale.

	Précipitations annuelles	Début de la saison des pluies	Fin de la saison des pluies	Durée de la saison des pluies	Régression multiple
Coefficient de corrélation	0.53	-0.47	0.35	0.49	
Coefficient de détermination	0.29	0.22	0.12	0.24	0.33
Significatif avec une marge d'erreur inférieure à	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%

Tableau 4.8 : Coefficients de corrélation et de détermination entre le niveau d'intensification agricole dans une localité agraire (ici représentée par une cellule de 0,25 x 0,25°) et les paramètres de la saison des pluies.

Pour confirmer ces tendances, les variables considérées sont discrétisées. Les graphes de la figure 4.18 représentent la probabilité qu'une parcelle agricole soit cultivée de manière intensive en fonction des conditions pluviométriques moyennes rencontrées dans cette parcelle. Les tendances déjà observées à l'échelle municipale apparaissent alors clairement. Ainsi, le niveau d'intensification agricole dépend largement du total précipité annuellement. Par exemple, dans les régions agricoles où les précipitations annuelles sont inférieures à 1500 mm/an, moins de 10% des surfaces agricoles sont cultivées avec deux cultures commerciales successives. A l'inverse, ce taux augmente jusqu'à 59% dans les localités où les précipitations excèdent 1900 mm/an. Le constat est le même pour les autres paramètres pluviométriques observés. Dans les régions où les précipitations débutent avant le 10 octobre, le taux d'intensification est de 58% tandis qu'il n'est que de 25% dans les régions où les pluies apparaissent après le 25 octobre. En fait, le graphe présente une rupture aux environs du 15 octobre. Lorsque le début des pluies intervient avant cette date, la probabilité de semer deux cultures successives est supérieure à 50%. Dans le cas contraire, cette probabilité est inférieure à 30%. Cette date correspond aux observations effectuées sur le terrain. Par exemple, des producteurs de Sorriso prétendent qu'il n'est plus viable de semer du maïs après le 18 février. En supposant qu'il faut 120 jours pour cultiver un soja à cycle long, il est donc nécessaire de semer le soja avant le 18 octobre pour pouvoir effectuer le semis du maïs avant la date limite de fin février. Il existe cependant des variétés de soja à cycle plus court (jusqu'à 90 jours) qui peuvent également être semées et qui expliquent notamment pourquoi les taux d'intensification agricole restent relativement élevés (>25%) même dans les régions où le début des pluies est tardif.

La date de fin de la saison des pluies influence également l'adoption de pratiques culturales intensives. Lorsque la fin de la saison pluvieuse intervient avant le 25 mars, la probabilité de semer deux cultures successives est de 10%. Au contraire, lorsque les pluies s'arrêtent après le 5 avril, cette probabilité atteint 63%. Par conséquent, l'intensification agricole est plus pratiquée dans les régions où la durée de la saison des pluies est longue. Par exemple, 67% des surfaces agricoles dans les régions où la saison pluvieuse dure plus de 175 jours sont cultivées de manière intensive. Ce taux descend jusqu'à moins de 20% dans les régions où la saison des pluies est inférieure à 150 jours.

Les tendances observées entre le niveau d'intensification agricole et les paramètres pluviométriques sont confirmées statistiquement par des tests du Chi-2 permettant de mesurer la dépendance entre deux variables. Ces tests (fig. 4.18) indiquent tous une dépendance significative et confirment donc l'hypothèse selon laquelle la pluviométrie est un facteur influant sur les pratiques culturales adoptées au Mato Grosso. Dès lors, on peut conclure que

le climat est un paramètre important à prendre en compte pour comprendre l'évolution des territoires du soja au Mato Grosso. Comme cela a été observé dans ce travail notamment dans la Partie 3, toutes les régions agricoles matogrossenses sont des régions nouvelles. Ces territoires sont aujourd'hui encore en pleine mutation et tendent vers un même état final consistant à produire de manière intensive dans un espace consolidé, i.e. un espace où toutes les terres potentiellement exploitables sont ouvertes. Cependant, malgré le fait que tous ces nouveaux territoires aient été formés dans les années 1970, ils ne sont pas tous au même stade d'avancée du front pionnier. Certains sont à un stade de consolidation agricole et d'autres à un stade d'intensification agricole (cf Partie 3). De nombreux facteurs permettent d'expliquer ces différences. Notamment, la présence de routes d'exportation des produits agricoles peut expliquer pourquoi certaines régions agricoles sont plus développées que d'autres. Cependant, ce critère ne suffit pas sinon la région sud-est serait la région la plus intensive de l'Etat. Les conditions climatiques, et notamment pluviométriques, aident alors à comprendre l'évolution du front pionnier au Mato Grosso puisqu'il apparaît que les régions agricoles les plus développées sont les plus arrosées.

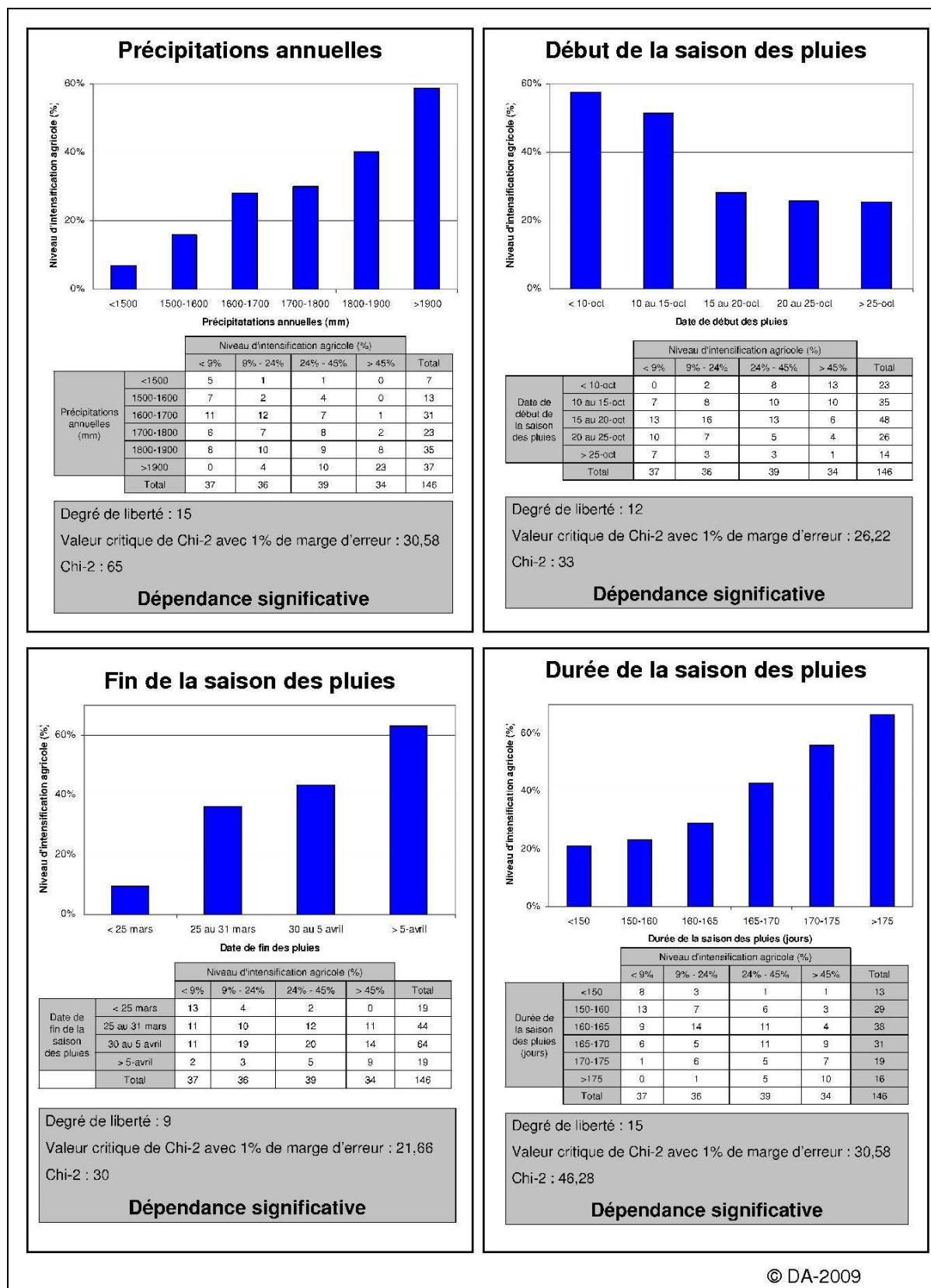


Figure 4.18 : Etude de la dépendance entre le niveau d'intensification agricole par localité agraire (pixel TRMM de 0,25° x 0,25°) et les paramètres de la saison des pluies.

4.2. La variabilité pluviométrique, un facteur de vulnérabilité pour les producteurs de soja

Nous avons donc démontré que les moyennes pluviométriques étaient un facteur explicatif des pratiques agricoles adoptées dans les principales régions de production de soja au Mato Grosso. Ainsi, les régions les plus arrosées sont celles où l'agriculture intensive est la plus pratiquée. Cependant, les précipitations au Mato Grosso sont également caractérisées par une forte variabilité interannuelle. Il convient donc de présenter cette variabilité et de préciser comment elle peut représenter une source de vulnérabilité pour les producteurs de soja.

4.2.1. La variabilité pluviométrique au Mato Grosso

Les quatre communes déjà présentées au chapitre précédent sont ici reprises pour analyser la variabilité interannuelle des précipitations (tableau 4.9).

	Sapezal	Sorriso	Rondonopolis	Canarana
Niveau d'intensification agricole en 2006-2007	45%	51%	8%	4%
Cumul annuel de précipitations maximal (mm)	2100	2108	2005	2029
Cumul annuel de précipitations minimal (mm)	1482	1642	1287	1458
Variabilité du cumul annuel de précipitations (période 98-07) (mm) / coefficient de variation	618 / 0.11	466 / 0.09	718 / 0.14	571 / 0.10
Durée de la saison des pluies la plus longue (période 98-07)	172	181	169	178
Durée de la saison des pluies la plus courte (période 98-07)	129	151	119	142
Variabilité de la durée de la saison des pluies (jours)	43	30	50	36
Nombre de jours moyen entre les dates de début des pluies selon le seuil (2,2 mm/jour ou 5,1 mm/jour)	38	24	38	25
Date du début des pluies le plus tardif (période 98-07)	03-déc	01-nov	01-déc	05-nov
Date du début des pluies la plus précoce (période 98-07)	30-sept	23-sept	24-sept	02-oct
Variabilité du début des pluies (jours)	64	39	68	34
Date de fin des pluies la plus tardive (période 99-07)	11-avr	12-avr	10-avr	13-avr
Date de fin des pluies la plus précoce (période 99-07)	27-févr	21-mars	15-févr	23-févr
Variabilité de la fin des pluies (jours)	43	22	54	49

Tableau 4.9 : Variabilité de la saison des pluies pour les quatre communes prises en exemple dans l'étude : Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana.

Les résultats montrent que la variabilité interannuelle des précipitations n'est pas la même dans toutes les régions agricoles, même si les communes étudiées présentent des maxima pluviométriques comparables. En effet, les cumuls pluviométriques annuels maximum sont supérieurs à 2000 mm pour les quatre communes. Les saisons des pluies les plus longues ne varient qu'entre 169 jours (à Rondonopolis) et 181 jours (à Sorriso). Les dates de début des pluies les plus précoces interviennent entre le 23 septembre (Sorriso) et le 2 octobre (Canarana) tandis que les dates de fin des pluies les plus tardives sont comprises entre le 10 et le 13 avril. La différence se fait donc surtout au cours des années les plus sèches. Les cumuls pluviométriques annuels minimum varient entre 1287 (à Rondonopolis) et 1642 mm (à Sorriso) entre les quatre communes. De même, la durée de la saison des pluies est au minimum de 151 jours à Sorriso (5 mois) contre 119 jours à Rondonopolis (4 mois). Cette différence s'explique par des dates de début des pluies qui peuvent intervenir très tardivement au sud-est (début décembre) alors qu'à Sorriso le début des pluies intervient au plus tard début novembre. Le constat est identique pour la date de fin de saison des pluies puisqu'elle n'est observée qu'à partir du 21 mars au plus tôt à Sorriso contre le 15 février à Rondonopolis.

Par conséquent, la variabilité pluviométrique est moins importante à Sorriso que dans les autres régions. La durée et les dates de début et de fin de la saison des pluies ne varient que de 30, 39 et 22 jours respectivement entre les années extrêmes. Au contraire, à Rondonopolis, les valeurs correspondantes sont de 50, 68 et 54 jours. Les cumuls pluviométriques sont également plus variables au sud-est qu'au centre de l'Etat comme l'indiquent les coefficients de variation (0,14 à Rondonopolis contre 0,09 à Sorriso). Les communes de Sapezal et Canarana présentent des valeurs intermédiaires entre les deux extrêmes représentés par Sorriso et Rondonopolis.

Enfin, le tableau 4.9 présente également le nombre de jours moyens observés entre la date de début des pluies avec un seuil à 2,2 mm/jour et un seuil à 5,1 mm/jour. Cette différence moyenne varie entre 24 et 25 jours (à Sorriso et Canarana) et 38 jours à Sapezal et Rondonopolis. En fait, en se basant sur un seuil à 2,2 mm, le début de la saison pluvieuse intervient relativement tôt et uniformément sur le territoire (entre le 15 et le 22 septembre en moyenne dans les quatre communes). Or, nous avons vu que le début de la saison des pluies avec un seuil à 5,1 mm/jour varie davantage (entre le 10 et le 27 octobre). Ainsi, dans certaines communes, il existe un risque de semer le soja précocement, dès l'apparition des pluies (avec un seuil de 2,2 mm/jour), et d'être soumis à une éventuelle période sèche postérieure. Par conséquent, il serait plus souhaitable de baser le semis du soja sur le seuil à 5,1 mm/jour plutôt que sur le seuil à 2,2 mm/jour. D'une certaine manière, c'est d'ailleurs ce que les producteurs font puisque nous avons vu que le soja était semé en moyenne 10 jours après le début de la saison des pluies au seuil de 2,2 mm /jour. Ils essaient donc de conserver une certaine marge de sécurité.

Dès lors, la variabilité interannuelle dans la date de début de saison des pluies influe sur les pratiques agricoles et sur la vulnérabilité des cultures du soja. L'exemple de la commune de Lucas do Rio Verde, validé par les entretiens réalisés sur le terrain, est à ce titre très évocateur. En 2004-2005, la saison pluvieuse a commencé tardivement : le 4 octobre avec le seuil à 2,2 mm/jour (alors qu'en moyenne le début des pluies y intervient le 16 septembre). Cependant, le semis du soja n'a pas été retardé puisqu'il a été réalisé en moyenne le 6 octobre sur la commune (d'après les données MODIS TERRA/EVI). Cela indique donc qu'un nombre important de producteurs ont semé avant le début de la saison des pluies, en pariant sur une arrivée des pluies imminente. Or celle-ci a tardé puisqu'il a fallu attendre le 24 octobre pour

atteindre le stade de début des pluies au seuil de 5,1 mm/jour. Ainsi, de nombreuses cultures de soja sont restées dans les champs entre fin septembre et fin octobre en situation de stress hydrique. De nombreuses parcelles ont alors dû être ressemées à la fin du mois d'octobre, ce qui a augmenté les coûts de production et empêché de réaliser un semis de maïs en succession du soja. D'après l'IBGE, seulement 100000 hectares de maïs ont été semés lors de cette récolte contre 140000 ha et 146000 ha lors des récoltes précédentes et suivantes. De plus, les rendements du soja ont lourdement chuté atteignant 40 sacs/ha (2,44 tonnes/ha) en 2004-2005 alors que les rendements des années précédentes et suivantes sont estimés à 58 sacs/ha (3,48 tonnes/ha) et 54 sacs/ha (3,35 tonnes/ha) respectivement. Toujours selon l'IBGE, cela s'est traduit par une perte de rentabilité pour la commune de 14 millions de reais par rapport à l'année précédente. Toutefois, ces pertes sont à relativiser par rapport à celles enregistrées lors de la récolte suivante (2005-2006) à cause de la dévalorisation du dollar : 50 millions de reais, malgré des rendements satisfaisants. Il convient donc de garder à l'esprit que le secteur agricole matogrossense est plus vulnérable à la conjoncture économique qu'aux conditions climatiques.

4.2.2. Les indicateurs de la vulnérabilité

En partant de l'exemple observé à Lucas do Rio Verde, on peut émettre l'hypothèse que la variabilité climatique, et notamment la variabilité du début de la saison des pluies, liée à une volonté d'intensification agricole est un facteur de vulnérabilité pour les producteurs de soja. Cette vulnérabilité est analysée à partir des relations de dépendance entre niveau d'intensification agricole, dates de semis, rendements et valeurs de EVI.

4.2.2.1. Les dates de semis sont dépendantes du niveau d'intensification agricole

La date de semis moyenne est calculée pour les types d'utilisation du sol déterminés par la classification des séries temporelles MODIS TERRA/EVI comprenant une culture de soja, i.e. les classes « soja », « soja+ culture non commerciale », « soja+maïs » et « soja+coton ». L'année 2006-2007 est prise en exemple et les résultats présentés en figure 4.19 indiquent que les dates de semis varient en fonction de la classe d'utilisation du sol. Ainsi, les premières parcelles de soja sont semées en moyenne le 11-octobre afin de réaliser une récolte dès janvier et de pouvoir semer du coton en succession du soja. Lorsque le maïs est choisi en deuxième culture, le constat est identique même si le soja est semé légèrement plus tard (en moyenne le 17-octobre). Ce léger décalage est dû au fait que le cycle du maïs est plus court que celui du coton. Les producteurs préfèrent donc semer le coton avant le maïs. Une fois que les parcelles destinées à recevoir deux cultures commerciales ont été semées en soja, les sojiculteurs sèment le soja (en moyenne le 1^{er} novembre) qui sera suivi d'une culture de sorgho ou de millet à l'automne pour protéger les sols et permettre la réalisation d'un semis direct lors de la récolte suivante. Enfin, les dernières parcelles semées en soja (en moyenne le 7 novembre) sont semées sans couverture végétale après la récolte. Cette dernière étant effectuée tardivement, il ne reste plus suffisamment de temps pour profiter des dernières pluies afin de semer une couverture végétale.

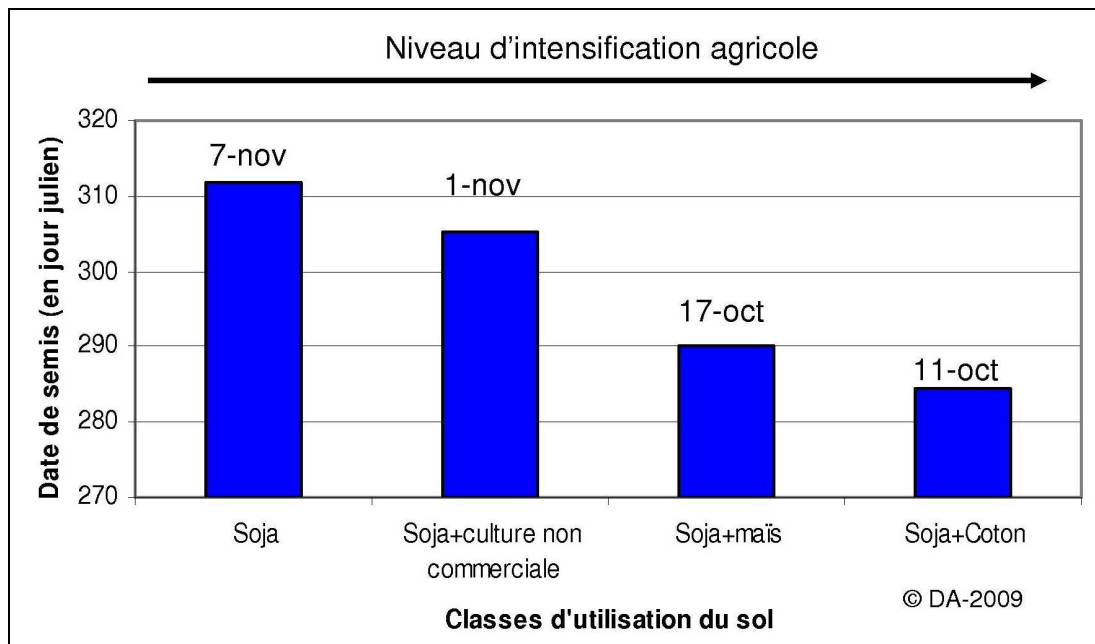


Figure 4.19 : Evolution des dates de semis du soja en fonction de la classe d'utilisation du sol au Mato Grosso pour la récolte 2006-2007. Les dates de semis et les classes d'utilisation du sol sont déterminées à partir des séries temporelles MODIS TERRA/EVI.

Ces observations sont confirmées statistiquement en réalisant un test du Chi-2 à l'échelle locale (fig. 4.20). Les résultats montrent une dépendance significative entre les dates de semis et le niveau d'intensification agricole (pourcentage de surface agricole semée en double cultures commerciales). Ainsi, la probabilité d'adopter un système de production avec deux cultures commerciales est de 70% lorsque le semis est réalisé avant le 22-octobre. Cette probabilité décroît au fur et à mesure que le semis est retardé. Finalement, pour un semis réalisé après le 10 novembre, la probabilité n'est plus que de 3%.

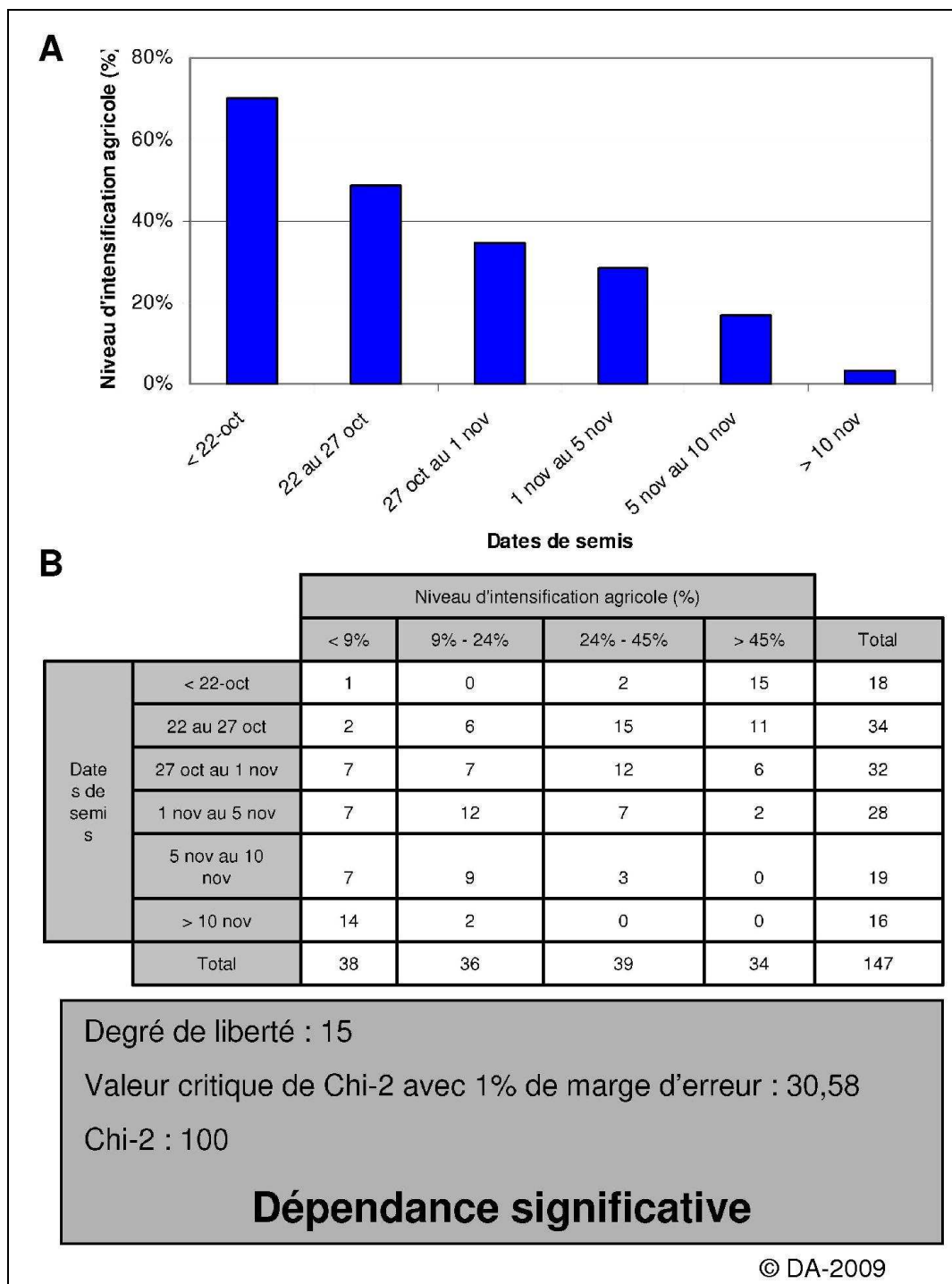


Figure 4.20 : (A) Evolution du niveau d'intensification agricole en fonction de la date de semis ; (B) Test du Chi-2 d'indépendance entre les dates de semis et le niveau d'intensification agricole. Le niveau d'intensification et les dates de semis sont déterminés pour chaque cellule de 0,25° x 0,25° à partir des images MODIS TERRA/EVI.

4.2.2.2. Les rendements sont dépendants des dates de semis

La figure 4.21.A présente l'évolution des rendements en fonction des dates de semis. Les meilleurs rendements (plus de 55 sacs/ha) sont obtenus en semant entre les dates conseillées par la FMT (du 8 octobre au 15 novembre). Cependant, les parcelles semées précocement donnent également des rendements satisfaisants (moyenne supérieure à 52

sacs/ha). Il peut donc s'avérer intéressant pour les producteurs de semer tôt (fin septembre-début octobre). Ceux-ci l'ont d'ailleurs bien compris puisque la période de semis la plus intense est comprise entre le 10 et le 20 octobre (figure 4.22), i. e. au début de la période de semis conseillée (résultats obtenus à partir des 928 parcelles, non présentés ici). Ainsi, à la date du 8 octobre, 25% du soja est déjà semé. Ce taux atteint 50% dès le 20 octobre et, à la fin de la période de semis recommandée (15 novembre), il est de 91%. A l'inverse, les semis tardifs (après le 1^{er} novembre) s'accompagnent d'une baisse sensible des rendements (le pic de hauts rendements obtenus en semant vers le 25 novembre est lié à un effet local dans les données récoltées¹).

La figure 4.21.B permet d'affiner l'étude en présentant la probabilité d'obtenir des rendements extrêmes ou moyens en fonction de la date de semis. Les valeurs de rendements sont discrétisées en cinq classes. Le graphe montre qu'il y a une plus forte probabilité d'obtenir des rendements élevés (> 60 sacs/ha) en semant aux environs du 25 octobre. A l'inverse, la courbe des rendements les plus faibles (<45 sacs/ha) présente deux pics correspondant à deux périodes au cours desquelles la probabilité d'obtenir des rendements faibles augmente. Ces périodes sont situées après le 1^{er} novembre et début octobre. Cela confirme donc en partie les conclusions réalisées à partir de la figure précédente puisque les rendements les plus faibles (<45 sacs/ha) sont surtout liés à des dates de semis tardives² (13% des mauvais rendements récoltés sont semés vers le 15 novembre). Toutefois, alors que la figure 4.21.A démontrait que les rendements moyens obtenus en anticipant le semis étaient bons (>52 sacs/ha), la figure 4.21.B indique qu'il existe un risque à semer le soja trop précocement. Ainsi, même si à moyen terme, il peut s'avérer payant de semer le soja tôt dans la saison des pluies, il faut s'attendre à connaître des pertes de rendements ponctuelles. La variabilité interannuelle des précipitations peut être une cause de ces chutes de rendements, comme l'a illustré l'exemple de Lucas do Rio Verde.

Les deux figures montrent finalement que les meilleurs rendements sont obtenus en semant entre les dates recommandées par la Fundação MT (FMT). Cependant, il apparaît que la productivité baisse dès lors que le soja est semé après le 1^{er} novembre, et non le 15 novembre comme proposé par la FMT. Ceci est lié au fait que les données employées ici n'ont été collectées que dans deux régions agricoles de l'Etat au contraire de la FMT dont l'aire d'étude englobe les quatre régions agricoles. Les dates de semis optimales pour la culture du soja varient donc entre les régions agricoles. Les données satellitaires pourraient alors représenter un outil intéressant pour déterminer ces dates optimales de semis à une échelle plus fine que celle employée par la FMT³.

¹ Les données ont été récoltées lors d'entretiens réalisés avec des producteurs de la région centre et de la région de la Chapada dos Parecis. Parfois, dans certaines fazendas, quelques grandes parcelles ont été semées tardivement et ont tout de même permis d'obtenir des bons rendements. Ces parcelles prennent alors beaucoup d'importance dans le calcul des rendements en fonction de la date de semis, bruyant la relation analysée.

² Les rendements du soja baissent lorsque le semis est trop tardif car les conditions photopériodiques ne sont pas optimales. Au Mato Grosso, la durée du jour s'allonge jusque fin décembre. Lorsque le soja est semé trop tard, les journées longues réduisent la durée du cycle végétatif. Ainsi, les cultures atteignent la phase reproductive sans que le cycle végétatif n'ait été correctement effectué entraînant des chutes de rendements. De plus, lorsque le soja est semé tardivement, il est plus vulnérable aux maladies telles que la rouille asiatique.

³ La cartographie des dates de semis optimales devrait faire l'étude de nouvelles recherches s'appuyant sur la relation entre les rendements, le EVI et les dates de semis. Deux possibilités d'étude sont présentées ci-dessous. Il s'agirait de déterminer la période optimale de semis comme étant la période au cours de laquelle :

- (i) les valeurs maximales de EVI sont supérieures à 75% (par exemple) de la plus haute valeur de EVI mesurée sur la zone considérée ;
- (ii) la probabilité d'obtenir une valeur de EVI supérieure à un seuil (0,75 par exemple) est supérieure à 50% (par exemple).

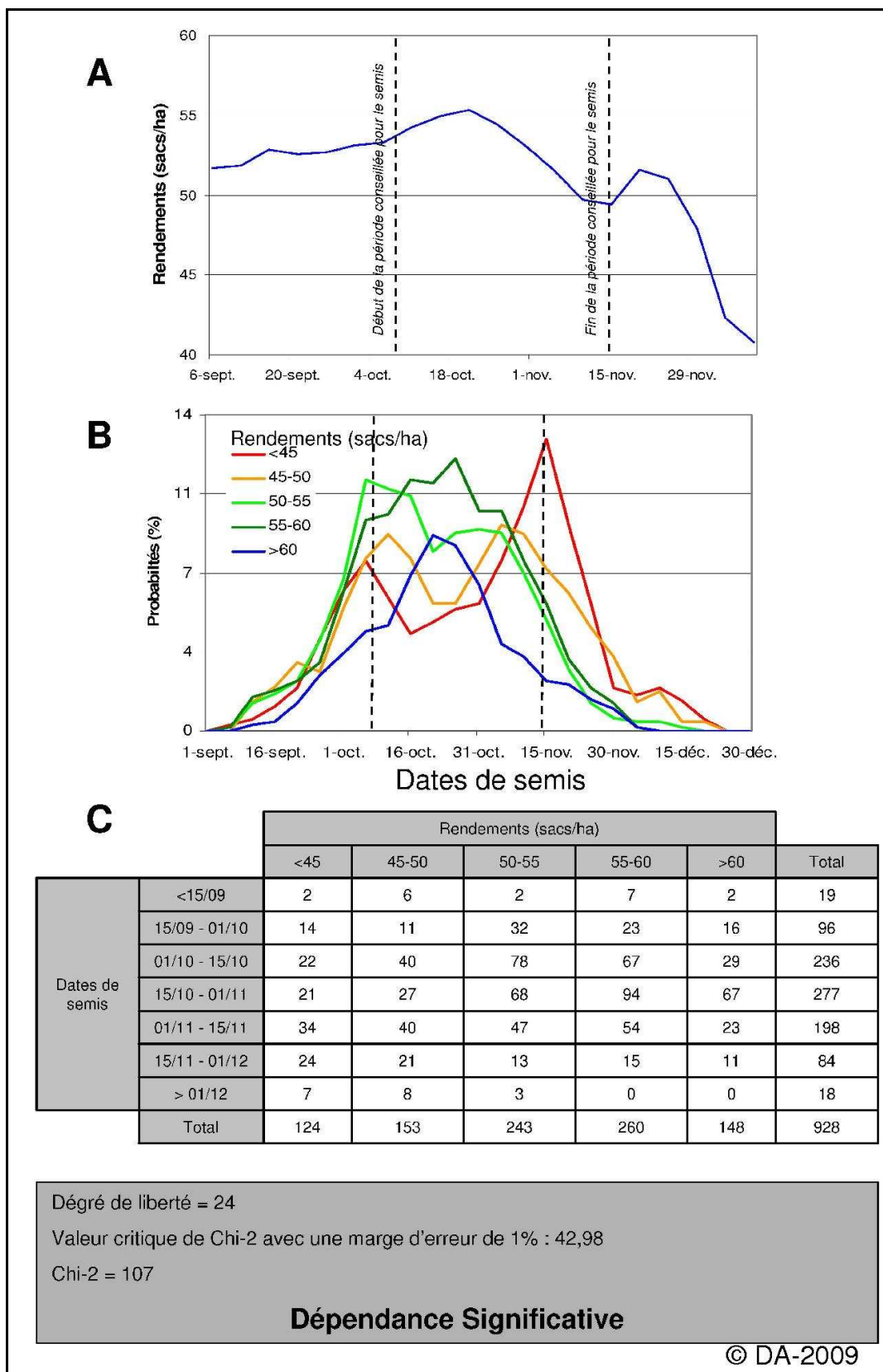


Figure 4.21 : (A) Evolution des rendements en fonction de la date de semis ; (B) Probabilité d'obtenir des rendements faibles, moyens ou élevés en fonction de la date de semis ; (C) Test du Chi-2 d'indépendance entre les rendements et les dates de semis. Les dates de semis et les rendements ont été obtenus lors de missions de terrain. Elles concernent 928 parcelles qui ont été renseignées au moins une fois entre 2003-2004 et 2006-2007.

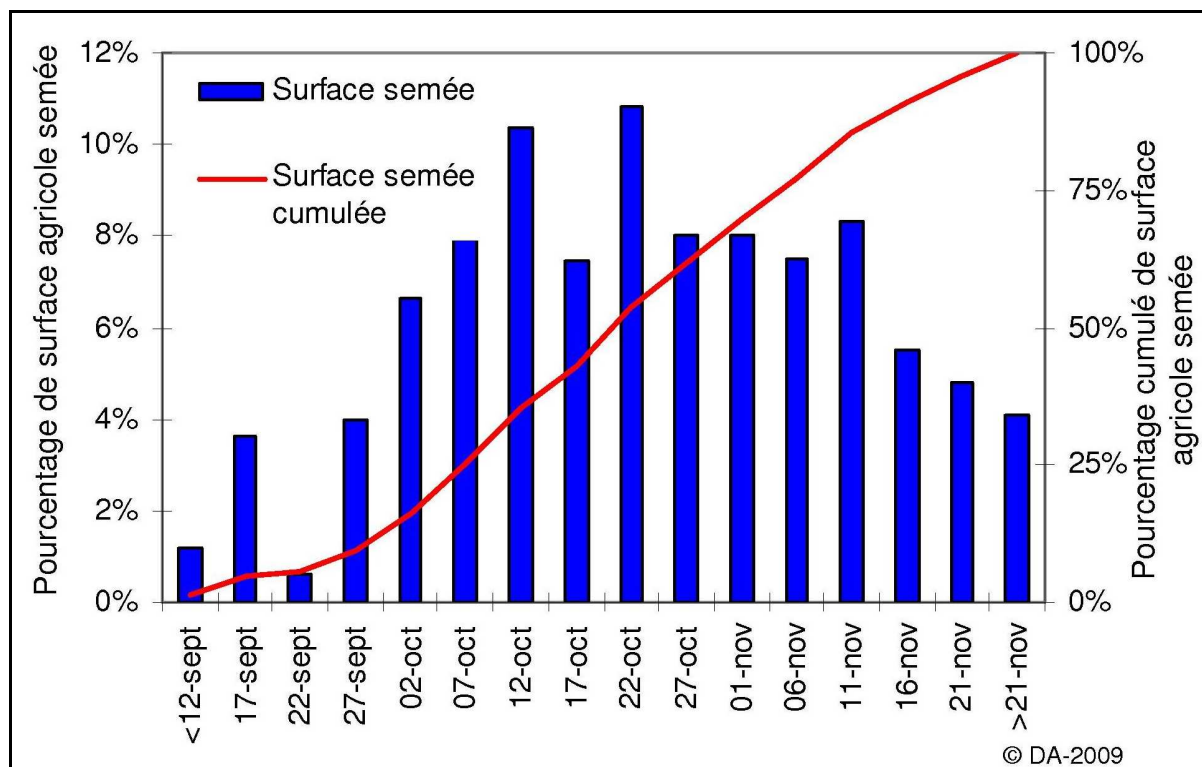


Figure 4.22 : Evolution de la superficie semée par période de semis au Mato Grosso. Les chiffres sont calculés à partir de 928 parcelles (161 158 ha) renseignées au moins une fois entre 2003-2004 et 2006-2007.

4.2.2.3. Les valeurs de EVI sont dépendantes des dates de semis

De la même manière que les rendements sont dépendants des dates de semis, les résultats démontrent qu'il existe un lien entre les dates de semis et les valeurs de EVI. La figure 4.23.A. présente ainsi une allure semblable à la courbe de la figure 4.21.A. mettant en relation les rendements et les dates de semis. Ici, les parcelles semées entre les dates de semis recommandées par la FMT présentent les valeurs maximales de EVI les plus élevées (environ 0,8), traduisant un développement végétatif optimal. Les valeurs de EVI des parcelles semées précocement sont légèrement plus basses mais restent tout de même élevées ($> 0,75$). Ceci confirme le fait que la croissance du soja se déroule correctement même lorsque le semis est anticipé, ce qui permet d'assurer des rendements moyens intéressants. Enfin, les plus faibles valeurs maximales de EVI sont obtenues pour les parcelles semées tardivement, après le 1^{er} novembre environ, ce qui corrobore les résultats observés sur la relation entre rendements et dates de semis.

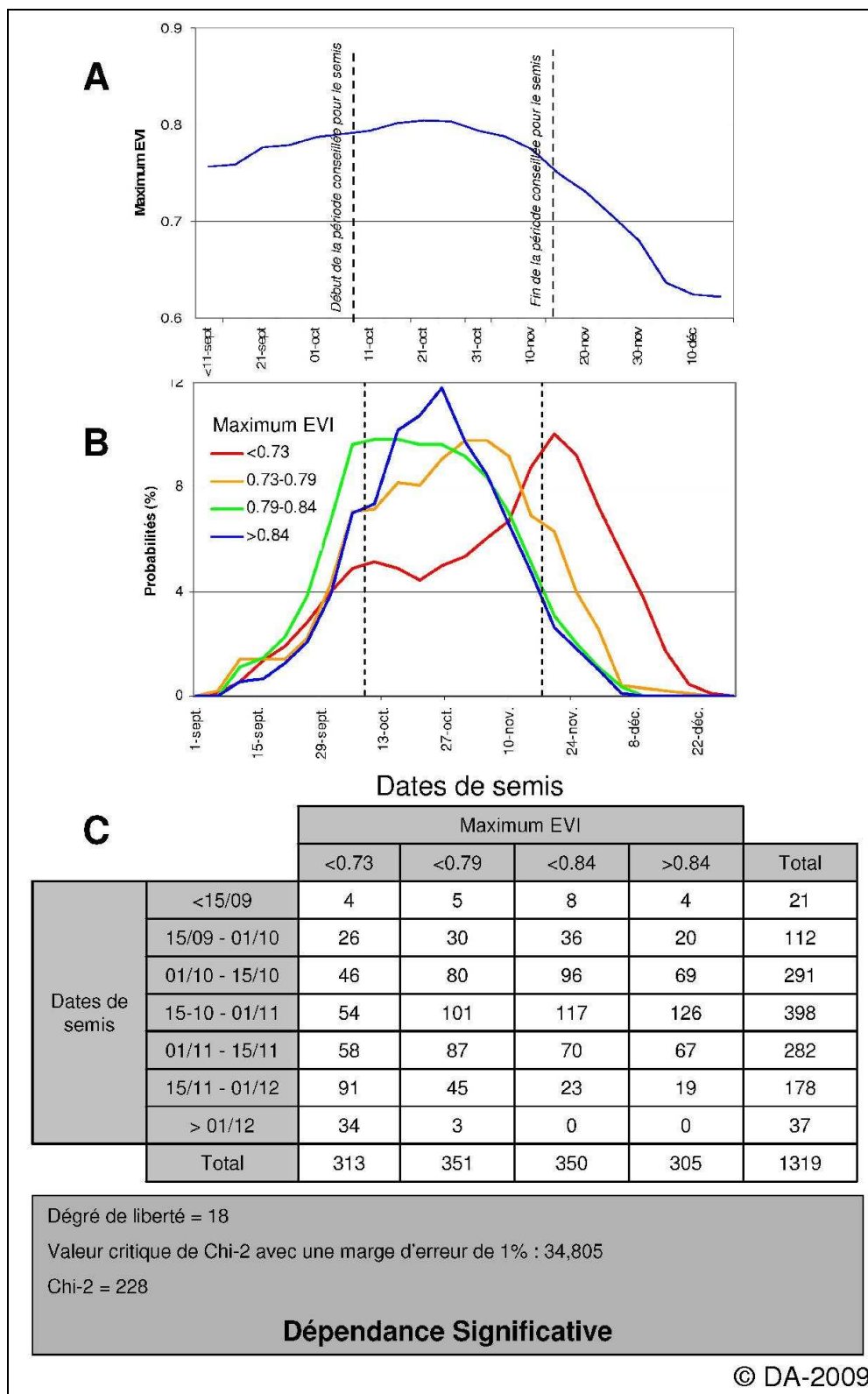


Figure 4.23 : (A) Evolution des valeurs maximales de EVI en fonction de la date de semis ; (B) Probabilité d'obtenir des valeurs maximales de EVI faibles, moyennes ou élevées en fonction de la date de semis ; (C) Test du Chi-2 d'indépendance entre les valeurs maximales de EVI et les dates de semis. Les dates de semis ont été obtenues lors de missions de terrain. Elles concernent 1319 parcelles qui ont été renseignées au moins une fois entre 2003-2004 et 2006-2007. Les valeurs maximales sont mesurées à partir des séries temporelles issues des données MODIS TERRA/EVI pour ces mêmes parcelles.

La figure 4.23.B. confirme ces premiers résultats en présentant la probabilité d’obtenir des valeurs maximales de EVI hautes, faibles ou intermédiaires en fonction de la date de semis. Il apparaît que les plus fortes probabilités d’obtenir des valeurs de EVI élevées correspondent aux parcelles semées aux environs du 20 octobre, i. e. au cœur de la période de semis recommandée. De même, les valeurs intermédiaires de EVI sont majoritairement mesurées dans les parcelles semées entre le 8 octobre et début novembre. Enfin, les plus faibles valeurs de EVI correspondent aux parcelles semées en dehors des périodes conseillées. Comme dans le cas de l’étude de la relation entre dates de semis et rendements, il existe ici aussi deux pics de probabilités d’obtention de valeurs de EVI faibles. Ainsi, les parcelles semées tardivement, après le 15 novembre, présentent de fortes probabilités de présenter des valeurs de EVI inférieures à 0,73. Des faibles valeurs de EVI sont aussi observées dans les parcelles semées précocement, jusque début octobre. Ceci confirme donc ce qui avait été observé précédemment : les parcelles semées précocement présentent des valeurs de EVI intéressantes mais sont plus vulnérables puisqu’il existe une probabilité accrue d’y observer des faibles valeurs de EVI. Finalement, la dépendance entre les valeurs de EVI et les dates de semis est validée statistiquement par un test de Chi-2 d’indépendance (fig. 4.23.C).

4.2.2.4. Les valeurs de EVI sont dépendantes des rendements

La date de semis étant un facteur explicatif des rendements, la relation qui vient d’être démontrée implique que le EVI soit un indicateur potentiel des rendements. La figure 4.24 présente les séries temporelles de EVI des parcelles dont les rendements ont été renseignés pour les récoltes 2005-2006 et 2006-2007. Ces séries temporelles sont reclassées en fonction des rendements observés. Sur les deux graphes, un lien apparaît entre l’aspect des séries temporelles et les rendements. En effet, les séries des parcelles aux rendements supérieurs à 60 sacs/ha présentent des valeurs de EVI supérieures aux autres. De même, les parcelles aux rendements les plus faibles (<50 sacs/ha) sont représentées par les valeurs de EVI les plus basses dans la période correspondant au cycle du soja (premier pic de EVI).

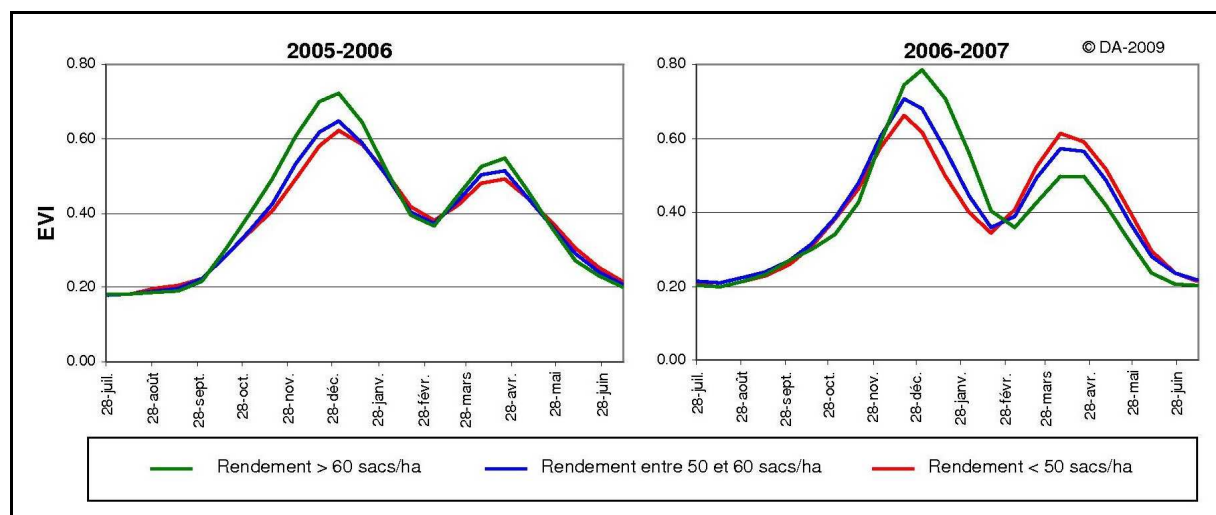


Figure 4.24 : Séries temporelles de EVI en fonction des rendements observés dans les parcelles dont les informations ont été renseignées lors de missions de terrain.

Cette hypothèse est vérifiée par le graphe de la figure 4.25 qui montre que plus les rendements sont élevés, plus les valeurs maximales de EVI mesurées dans les parcelles sont élevées. Ainsi, la moyenne des valeurs maximales de EVI mesurées dans les parcelles où les

rendements sont inférieurs à 45 sacs/ha est de 0,72. A l'inverse, dans les parcelles où les meilleurs rendements ont été enregistrés (> 65 sacs/ha), les valeurs maximales de EVI atteignent une moyenne de 0,84. Entre ces deux extrêmes, la relation EVI-rendements est linéaire. Finalement, un test de Chi-2 valide l'hypothèse d'une dépendance significative (avec 1% de marge d'erreur) entre les valeurs maximales de EVI et les rendements.

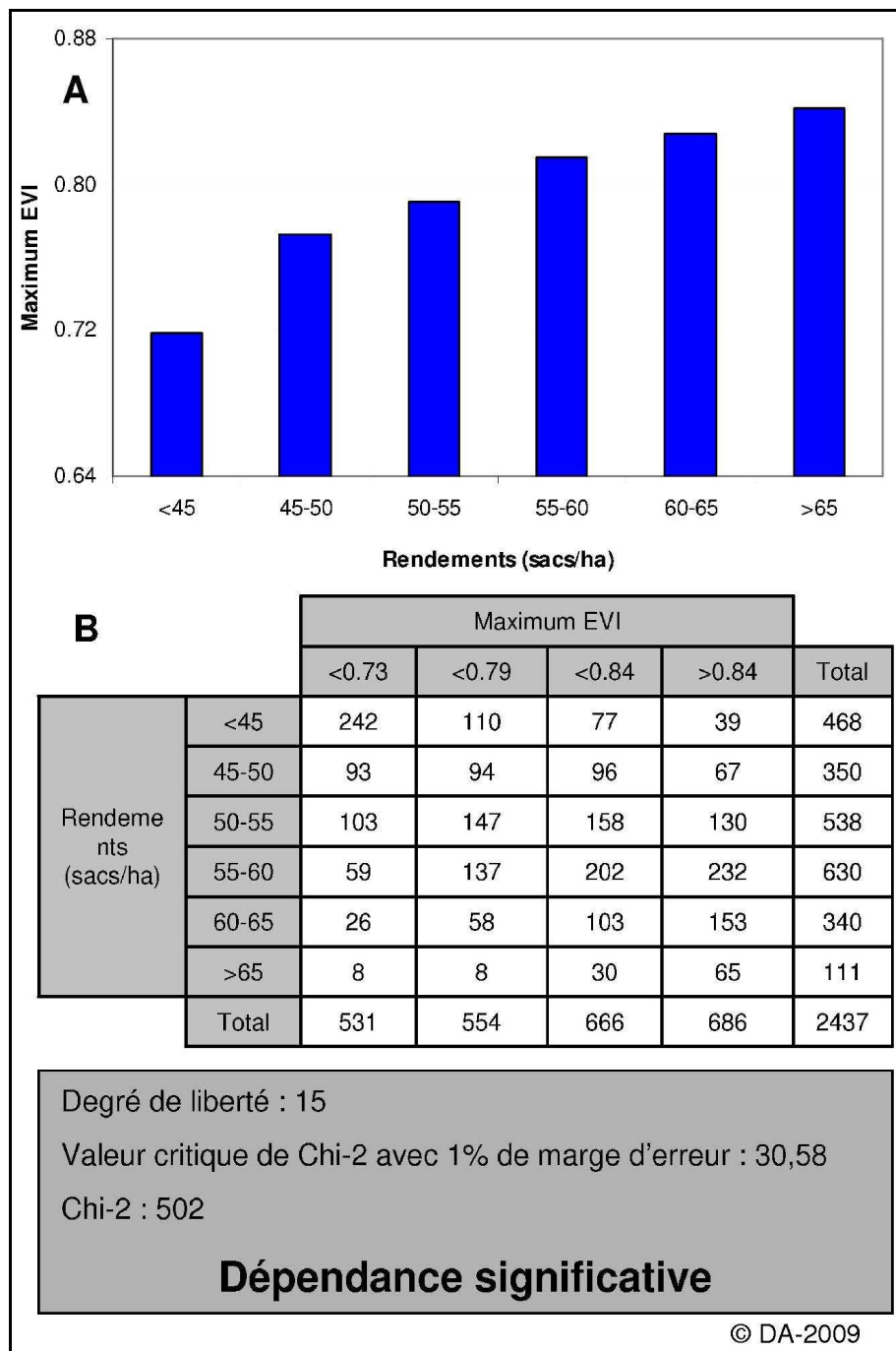


Figure 4.25 : (A) Evolution du maximum de EVI en fonction des rendements observés sur le terrain ; (B) Test du Chi-2 d'indépendance entre les valeurs maximales de EVI et les rendements. Les rendements ont été obtenus lors de missions de terrain. Elles concernent 2437 parcelles qui ont été renseignées au moins une fois entre 2003-2004 et 2006-2007. Les valeurs maximales de EVI sont mesurées à partir des séries temporelles issues des données MODIS TERRA/EVI pour ces mêmes parcelles.

L'existence de cette relation entre les valeurs de EVI et les rendements peut potentiellement permettre de spatialiser les rendements à partir des données MODIS. La figure 4.26¹ présente ainsi les séries temporelles moyennes de EVI (période 2000-2001 à 2006-2007) de cinq communes représentant les quatre régions agricoles du Mato Grosso. Pour chacune de ces communes, les rendements moyens de soja sur la même période calculés par l'IBGE sont comparés. La série temporelle de EVI la plus basse correspond à la commune de Canarana où les rendements sont effectivement les plus faibles (46,71 sacs/ha). A l'inverse, les meilleurs rendements sont observés à Lucas do Rio Verde (52,35 sacs/ha) dont les surfaces agricoles sont représentées par une série temporelle de EVI avec des valeurs élevées. Par contre, les résultats obtenus à Rondonopolis ne sont pas cohérents. Dans cette commune, la série temporelle est élevée alors que les rendements y sont moyens (48,77 sacs/ha). Ceci peut s'expliquer en partie par les données fournies par l'IBGE puisque, sur les sept récoltes prises en compte, les trois premières présentent des rendements de 50 sacs/ha, exactement, ce qui correspond au rendement moyen observé au Mato Grosso. On peut donc conclure que les rendements de ces années n'ont pas été mesurés par l'IBGE, qui s'est contenté de multiplier la surface semée par un rendement moyen pour obtenir la production de soja. D'une manière générale, même si un lien statistique existe entre les valeurs de EVI et les rendements, les limites des données IBGE (cf Partie 2 – Chapitre 3) et des séries temporelles MODIS TERRA/EVI (bruits, résolution spatiale et temporelle...) sont un frein à la validation d'une méthode d'estimation des rendements à l'échelle régionale et interannuelle. Des recherches plus approfondies à partir des données de terrain récoltées devraient par contre être menées à l'avenir pour évaluer le potentiel d'estimation des rendements à l'échelle de la parcelle.

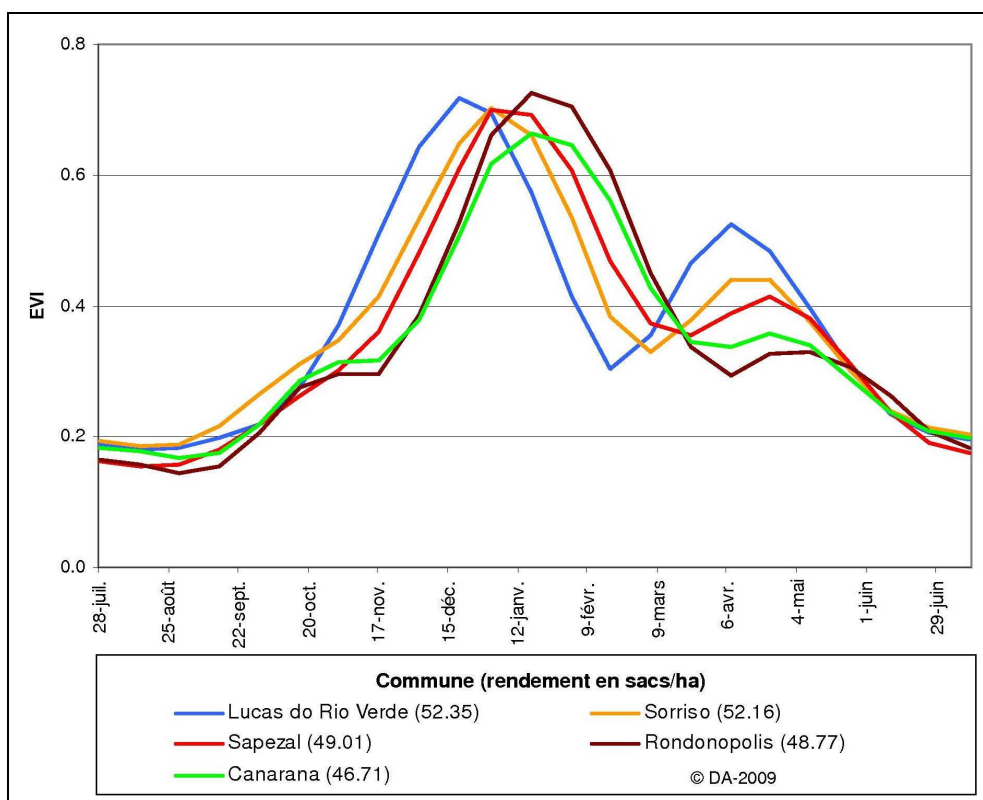


Figure 4.26 : Séries temporelles moyennes de EVI entre les récoltes 2000-2001 et 2006-2007 de cinq communes matogrossenses.

¹ NB : la figure 4.26 permet également de visualiser l'évolution du semis du soja au Mato Grosso. Les producteurs de Lucas do Rio Verde sont les premiers à semer alors que ceux de Canarana et de Rondonopolis sont les derniers.

4.2.3. La détection de situations à risques à partir des données TRMM et MODIS

Les relations présentées indiquent l'existence d'un lien entre les précipitations, le niveau d'intensification agricole, les dates de semis et les rendements. A partir de ces relations, les situations de semis à risque sont cartographiées pour les sept récoltes de la période d'étude. D'une manière générale, la proportion de surface agricole semée de manière risquée a augmenté entre 2000 et 2005, passant de 43% à 59%. Toutefois, en 2006-2007, 72% du soja a été semé pendant les périodes conseillées suite à un début des pluies précoce (fig. 4.27.B). Malgré cela, les rendements enregistrés lors de cette récolte ont été mauvais (44,64 sacs/ha selon l'IBGE) et rappellent que la date de semis ne suffit pas pour expliquer les rendements. Les chutes de productivité lors de cette récolte s'expliquent par la situation conjoncturelle. La baisse des cours du soja liée à une hausse des coûts de production est la cause d'un endettement chez les producteurs (cf. Partie 1 - Chapitre 4). Ceux-ci n'ont donc pas pu maintenir un niveau technologique satisfaisant (quantité d'intrants appliqués) et cela s'est traduit par une baisse de productivité.

L'augmentation de la proportion de surface agricole semée de manière risquée (trop tôt ou trop tard) est surtout due à une augmentation des surfaces agricoles semées précocement, notamment avant le début des pluies avec un seuil de 5,1 mm/jour. Cette part est passée de 10% à 31% du total des surfaces cultivées en soja entre 2000-2001 et 2005-2006. Par contre, les parcelles semées avant le début des pluies avec un seuil de 2,2 mm/jour restent minimales. Il est donc rare que les producteurs anticipent le semis par rapport au début des pluies. Il n'y a qu'en 2004-2005 que la proportion de surfaces agricoles semées très précocement a été significative (10%) car les précipitations sont apparues tardivement.

Les valeurs maximales de EVI observées pour ces classes de semis précoce ne sont pas inférieures à celles correspondant à la classe de semis dans la période recommandée (fig. 4.27.A). L'utilisation de pivots d'irrigation visant à assurer la bonne croissance des cultures et l'augmentation de la probabilité de pouvoir réaliser deux récoltes successives pourrait expliquer ce phénomène. Cependant, depuis 2005, une loi est rentrée en vigueur interdisant l'utilisation de pivots d'irrigation pour la culture du soja au Mato Grosso entre le 15 juin et le 15 septembre. Il s'agit de créer une période de « *vazio sanitario* » (vide sanitaire) de 90 jours au cours desquels aucune parcelle ne doit être cultivée en soja dans l'Etat. Cette période a pour but de freiner le développement de la maladie de la rouille asiatique. Dès lors, les valeurs de EVI élevées observées dans les parcelles semées précocement ne peuvent pas être expliquées par cette pratique. Ces valeurs indiquent surtout que les semis anticipés sont généralement bien réalisés à l'échelle régionale et expriment une bonne connaissance des précipitations de la part des producteurs. Toutefois, à une échelle locale, les semis précoces peuvent s'avérer catastrophiques comme nous l'avons vu avec l'exemple de Lucas do Rio Verde. Ainsi, l'avancée des dates de semis représente un facteur de vulnérabilité pour les cultures de soja.

L'augmentation des situations de semis précoce est liée au phénomène d'intensification agricole déjà observé dans cette thèse. Les producteurs doivent en effet semer de plus en plus tôt pour pouvoir semer deux cultures en succession. L'apparition de la maladie de la rouille asiatique lors de la récolte 2002-2003 a également incité les producteurs à semer plus tôt et à cultiver des variétés de soja de cycles plus courts. En effet, un soja semé tardivement a plus de risques d'être affecté par la maladie, celle-ci réapparaissant tous les ans avec la saison des pluies. Les variétés de soja à cycle court sont également moins en contact avec la maladie et présentent donc une plus faible probabilité d'être atteints. Cependant, elles

sont aussi plus vulnérables aux aléas climatiques que les variétés à cycle long car elles disposent de moins de temps pour récupérer en cas de stress hydrique par exemple. De la sorte, la vulnérabilité des cultures de soja face à la variabilité interannuelle des précipitations s'est accrue avec l'intensification agricole.

Toutefois, le fait de semer plus tôt a également permis de réduire la proportion de surface agricole semée tardivement, après la date limite du 15 novembre conseillée par la FMT. Cela est notamment vrai dans les régions qui intensifient leur production. Or les semis tardifs ont été associés à des rendements faibles comme le confirment les valeurs maximales de EVI observées pour cette classe, qui sont inférieures aux valeurs des autres classes (fig. 4.27.A). Ainsi, la réduction des semis tardifs compenserait les éventuelles pertes de rendements dues à des semis précoces. D'ailleurs, les valeurs maximales de EVI de cette classe ont augmenté régulièrement depuis 2002-2003 (année de l'apparition de la rouille asiatique) traduisant le fait que les rendements des cultures de soja s'améliorent.

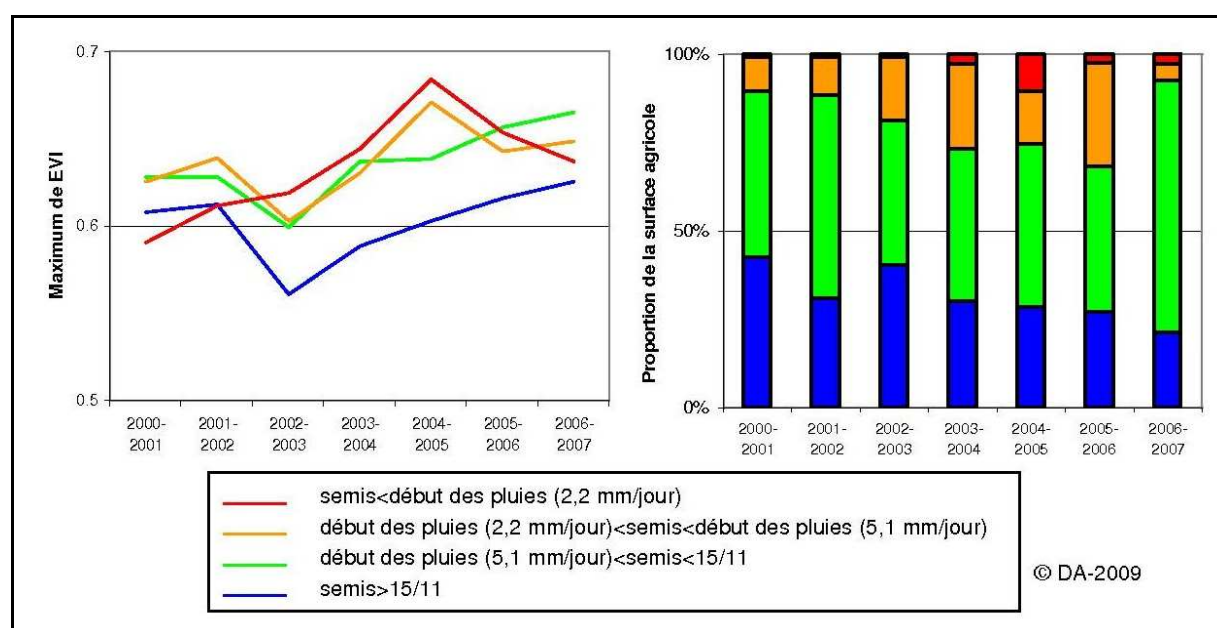


Figure 4.27 : (A) Evolution des valeurs maximales de EVI en fonction des date de semis au cours de la période 2000-2001 à 2006-2007 ; (B) Evolution de la proportion de surface agricole annuelle semée de manière anticipée, optimale ou tardive entre 2000-2001 et 2006-2007.

Outre la variabilité temporelle, la figure 4.28 montre qu'il existe une forte variabilité spatiale des situations de semis. Cette variabilité est illustrée en ciblant la présentation sur les régions agricoles de la Chapada dos Parecis et de Lucas do Rio Verde (fig. 4.29).

Toutes les années présentent des situations différentes. Par exemple, en 2000-2001, 2001-2002 et 2006-2007, les producteurs de toutes les régions agricoles ont semé après le début de la saison des pluies. Une partie des surfaces agricoles localisées dans la Chapada dos Parecis a même été semée après le 15 novembre. Dès lors, il existe un risque de chute des rendements puisqu'il a été démontré auparavant que les parcelles semées tardivement ont une plus forte probabilité de donner des rendements faibles. A l'inverse, au cours des récoltes 2002-2003, 2003-2004 et 2005-2006, les semis ont été réalisés plus précocement. La plupart des parcelles ont été semées avant le début de la saison des pluies à un seuil de 5,1 mm/jour. Elles ont donc été exposées à un risque plus élevé que les autres années et les rendements en

ont été légèrement affectés. En effet, les meilleurs rendements à Sapezal ont été obtenus en 2001 et 2002 (53 sacs/ha) tandis que les rendements des années suivantes sont régulièrement inférieurs à 50 sacs/ha. Cependant, l'hypothèse avancée ici n'explique pas toutes les pertes de rendements. L'apparition de la maladie de la rouille asiatique au Mato Grosso lors de la récolte 2002-2003 est certainement un autre facteur explicatif de cette baisse de productivité. En outre, les plus mauvais rendements datent de la récolte 2006-2007 (42 sacs/ha) alors que le semis semble y avoir été réalisé de manière optimale (entre le début des pluies et le 15 novembre). Dans ce cas, il existe donc d'autres facteurs à prendre en compte pour expliquer ces mauvais rendements : maladies, aléas pluviométriques en phase végétative ou reproductrice, baisse de l'investissement technologique suite à la crise économique débutée en 2005...

A Lucas do Rio Verde, la variabilité est également forte. Bien que ce soit dans cette commune que le soja est semé le plus tôt au Mato Grosso, le semis n'est généralement pas ou peu anticipé sur le début de la saison pluvieuse car c'est aussi la région où il pleut le plus tôt. Par conséquent, les rendements y sont particulièrement élevés, supérieurs à ceux observés à Sapezal par exemple. Toutefois, l'année 2004-2005 déjà évoquée précédemment illustre bien la vulnérabilité de la région aux aléas climatiques. Cette année-là, les producteurs ont semé tôt, anticipant sur un début des pluies imminent. Malheureusement pour eux, les pluies sont apparues plus tard que les autres années. De nombreuses parcelles ont donc été semées avant le début des pluies à un seuil de 2,2 mm/jour. La période de sécheresse dont a souffert le soja a été préjudiciable et les rendements ont fortement chuté, atteignant 40,71 sacs/ha.

Il convient cependant de rappeler que toutes les régions dans lesquelles des situations de semis à risque ont été détectées ne subissent pas automatiquement des baisses de rendements. Ainsi, même si dans le cas précis de Lucas do Rio Verde, le croisement des données MODIS et TRMM a permis de détecter les situations de vulnérabilité aux aléas pluviométriques en phase de semis. La méthodologie proposée dans cette thèse doit simplement servir d'indicateur permettant de repérer des régions vulnérables aux aléas climatiques afin d'y effectuer un suivi plus approfondi.

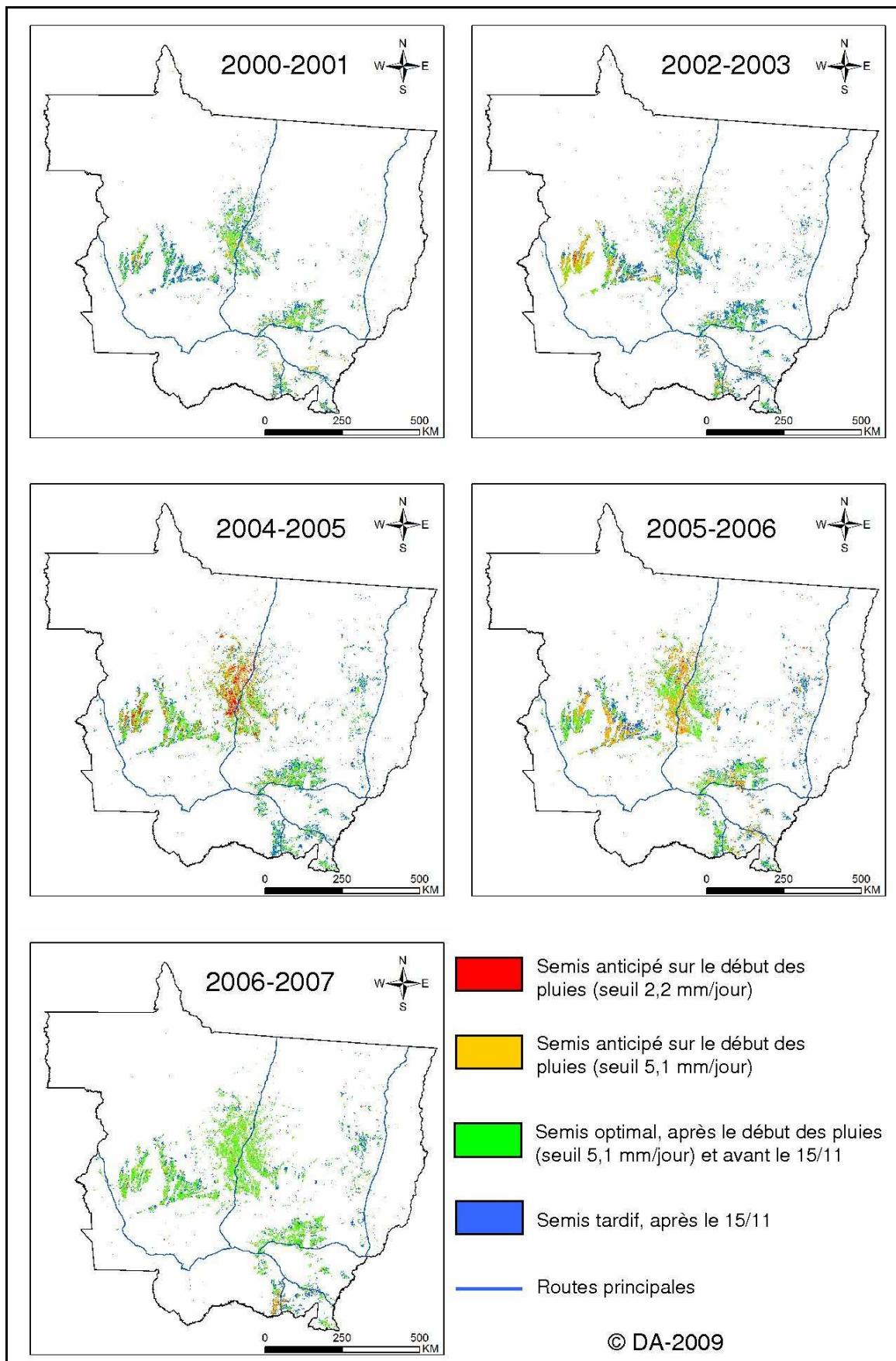


Figure 4.28 : Détection des situations de semis de soja au Mat Grosso (toutes les années ne sont pas présentées pour des raisons de place).

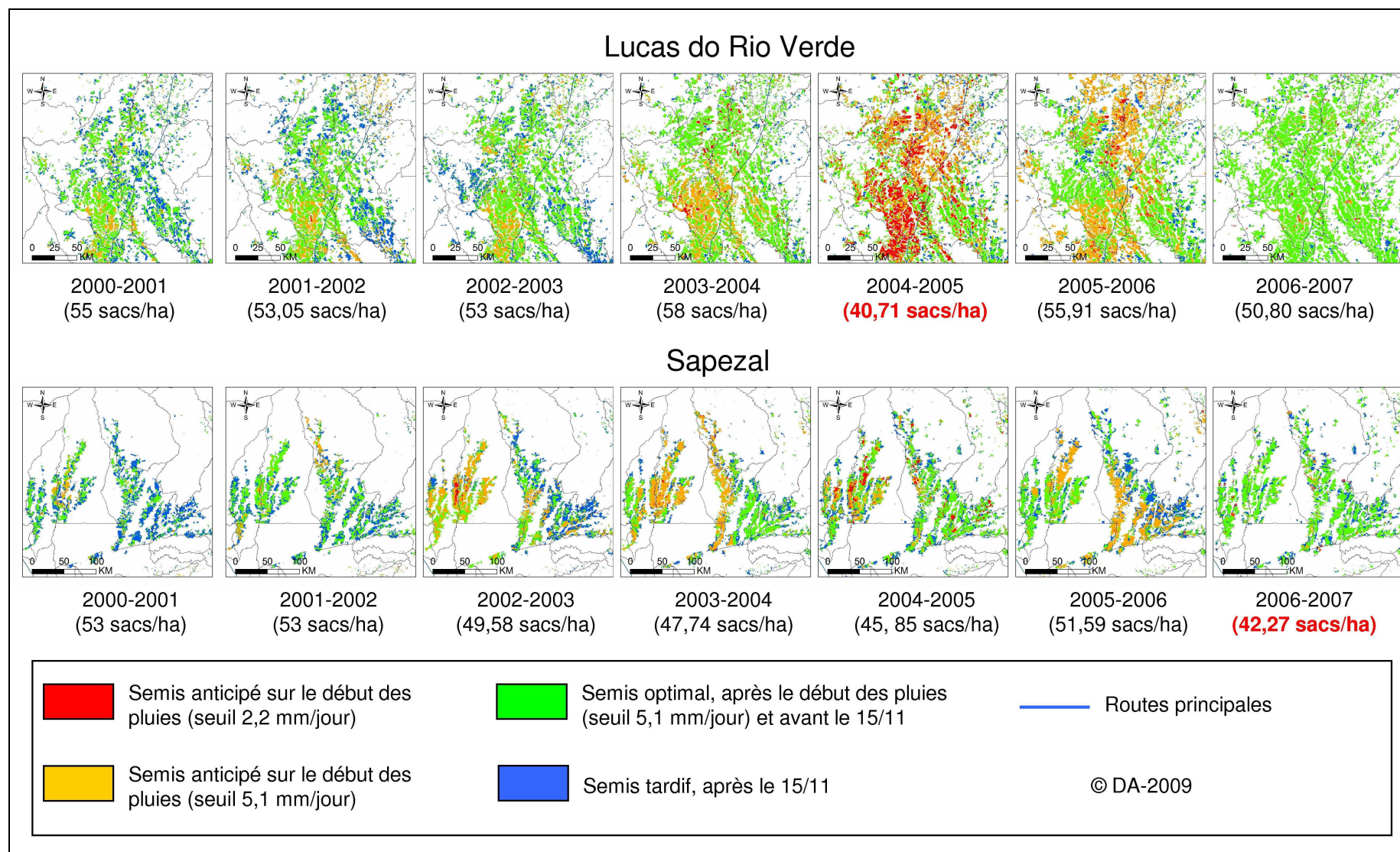


Figure 4.29 : Détection des situations de semis entre 2000-2001 et 2006-2007 pour les deux principales régions agricoles du Mato Grosso : la région centre, représentée par Lucas do Rio Verde (en haut) et la Chapada dos Parecis, représentée par Sapezal (en bas).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré que les précipitations sont un facteur essentiel à prendre en compte pour comprendre la progression du front d'intensification agricole. En effet, à l'échelle de la localité agraire, l'adoption de pratiques agricoles intensives basées sur le semis de deux cultures commerciales successives dépend fortement des moyennes pluviométriques des quatre paramètres définissant la saison des pluies (cumul annuel, début, fin et durée de la saison des pluies). La région centre est la plus arrosée et présente ainsi les taux d'intensification agricole les plus élevés (>50% à Sorriso). A l'inverse, la région sud-est, présentant des taux d'intensification faibles (<10%), est aussi la moins pluvieuse. La région Est (Qurencia, Canarana) fait figure d'exception. Les systèmes de production en double cultures commerciales n'y ont pas encore été massivement adoptés bien que les précipitations y soient comparables à celles observées dans la région centre. Ceci s'explique par l'arrivée récente du front économique dans cette région. Il sera intéressant de suivre l'évolution de l'intensification agricole dans cette région dans les années à venir.

Néanmoins, l'adoption de pratiques culturales intensives dans les régions les plus humides a aussi accru la vulnérabilité des producteurs de soja. En décidant de semer deux récoltes successives, les producteurs ont dû semer le soja plus tôt et donc s'exposer au risque que leurs cultures souffrent d'épisodes secs en phase d'émergence. Le cas de Lucas do Rio Verde en 2004-2005 est à ce titre très intéressant puisque les rendements ont largement été affectés suite à des semis trop anticipés sur le début de la saison des pluies. Mais ce cas n'est qu'un exemple localisé et les résultats à l'échelle régionale montrent qu'il est encore très rentable pour les sojiculteurs d'intensifier leur production. D'une part, les rendements (et les valeurs de EVI) observés dans les parcelles semées précocement sont satisfaisants bien qu'ils ne soient pas les plus élevés. Les rendements obtenus à Lucas do Rio Verde sont d'ailleurs parmi les meilleurs à l'échelle de l'Etat. D'autre part, les pertes éventuelles de rendements sont largement compensées par les gains potentiels enregistrés par la deuxième culture. Cette affirmation se vérifie surtout lorsque les cours du soja sont bas, comme cela a été le cas lors de la crise des années 2004-2007. Dès lors, même si il est vrai que la variabilité pluviométrique accroît la vulnérabilité des cultures de soja à l'échelle locale, il convient de préciser que, à l'échelle régionale, les producteurs parviennent à éviter, ou minimiser, l'impact d'adversités climatiques sur leurs productions (Santos, 2005). Selon ce même auteur, ceci a été rendu possible par l'adoption de technologies et de stratégies performantes telles que : (i) l'utilisation de variétés mieux adaptées au cerrado (notamment des variétés de SGM) ; (ii) une distribution spatiale et temporelle des variétés sur les parcelles de l'exploitation qui permet d'étaler les périodes de semis et de récolte dans le temps ; (iii) l'intensification des traitements chimiques ; (iv) l'utilisation du système de production en semis direct. Pour le moment, ces pratiques intensives permettent donc limiter les risques liées aux aléas climatiques. Cependant, ces méthodes d'adaptation seront-elles encore efficaces lorsque les signes d'un changement climatique se feront plus intenses ? Brou *et al.* (2005) et Seo et Mendelsohn (2008) ont démontré (en Côte d'Ivoire et en Amérique du Sud respectivement) que les producteurs devaient adopter de nouvelles stratégies d'adaptation en cas de changement climatique. Pour le moment, les sojiculteurs ne prennent pas vraiment ce fait en considération et craignent surtout les effets de la conjoncture économique qui affectent davantage leur rentabilité.

Synthèse de la Partie 4

Les estimations de précipitations issues des produits TRMM 3B42 sont utilisées pour présenter les conditions pluviométriques au Mato Grosso. Les estimations sont validées à partir de 116 stations au sol pour l'année pluviométrique 2004-2005. La méthode « *Anomalous Accumulation* » (Liebmann *et al.*, 2007) est adaptée pour définir les paramètres de la saison des pluies au Mato Grosso (début, fin et durée de la saison des pluies) en fonction des besoins en eau du soja. D'après ces paramètres, le début des pluies se met en place à partir du mois de septembre selon une orientation NW-SE. Au contraire, la fin des pluies s'organise à partir du mois de mars selon une orientation N-S.

Les produits TRMM 3B42 mettent en avant une forte variabilité spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso. Cette variabilité affecte notamment les quatre régions agricoles qui présentent des moyennes pluviométriques différentes. Ainsi, la région centre est la plus arrosée avec une saison des pluies qui dure en moyenne 10 à 15 jours de plus que dans les autres régions agricoles. Cette caractéristique permet alors aux producteurs de soja de cette région d'opter plus facilement pour un système de production en double cultures commerciales. Ainsi, la dépendance entre les précipitations et le niveau d'intensification agricole est vérifiée comme étant statistiquement significative à l'échelle locale. Par conséquent, les moyennes pluviométriques expliquent en partie les changements d'occupation et d'utilisation du sol identifiés à partir des données MODIS TERRA/EVI.

Pour intensifier leur production, les producteurs de soja sont obligés de semer le soja précocement comme le montrent les dates de semis calculées à partir des séries temporelles de EVI. Or, les semis précoces rendent les cultures de soja plus vulnérables aux aléas climatiques et notamment aux *veranicos*. Ce fait est vérifié à partir des relations de dépendances observées entre les dates de semis, les rendements et les valeurs maximales de EVI.

De la sorte, la variabilité spatiotemporelle des précipitations est un facteur de vulnérabilité pour les producteurs. Cette dernière est étudiée en croisant les données TRMM 3B42 et MODIS TERRA/EVI afin de cartographier les régions de semis à risque au Mato Grosso. Les résultats montrent que les surfaces agricoles de soja semées de manière anticipée par rapport au début de la saison des pluies ont augmenté ces dernières années. Elles représentent 59% des surfaces semées en soja lors de la récolte 2005-2006. Cela se traduit dans certains cas par de fortes chutes de rendements à l'échelle locale comme cela a été le cas à Lucas do Rio Verde en 2004-2005.

Toutefois, la vulnérabilité des cultures de soja face aux aléas climatiques est jugée acceptable par les producteurs de soja. En effet, il faut garder à l'esprit que la rentabilité de la production dépend davantage de la conjoncture économique ou de maladies (notamment la rouille asiatique) que des conditions climatiques. La crise connue par le secteur agricole matogrossense entre 2004 et 2007 confirme cette affirmation.

Conclusion générale

Synthèse des résultats obtenus

L'objectif de cette thèse était d'étudier les relations nature / société dans un espace en cours de colonisation tel que l'Amazonie. L'Etat du Mato Grosso offre un cadre d'étude intéressant car il symbolise tous les enjeux socio-économiques et environnementaux liés à la conquête de l'Amazonie. Dubreuil (2005) considère ainsi cet Etat comme un « laboratoire de l'Amazonie ». En effet, l'expansion des cultures de soja depuis la fin des années 1980 y a été fulgurante (Bertrand, 2004) et cela s'est traduit par des changements d'occupation et d'utilisation du sol plus spectaculaires que dans les autres états amazoniens.

Le front pionnier de colonisation est donc particulièrement dynamique au Mato Grosso. Il est le résultat combiné d'une forte volonté politique d'occupation de l'Amazonie, d'une croissance démographique marquée par l'arrivée de nombreux migrants et de conditions économiques qui, selon la conjoncture, agissent comme un moteur ou un frein à l'évolution du front. Par conséquent, nous considérons que le front pionnier s'organise en trois fronts successifs :

1- **le front d'ouverture** est lié à l'arrivée des migrants, souvent le long des axes routiers construits par l'Etat. C'est un facteur direct de déforestation ;

2- **le front économique** correspond ici à l'expansion agricole qui progresse plus ou moins rapidement en fonction des cours du soja. C'est un facteur direct et indirect de déforestation ;

3- **le front d'intensification agricole** constitue la dernière étape du front pionnier. Cette phase a pour but d'assurer le développement économique régional sur les terres déjà défrichées tout en limitant la vulnérabilité aux variations des cours du soja (par la diversification des cultures et l'amélioration des rendements notamment).

Dans les régions de production agricole du Mato Grosso, comme Sorriso par exemple, la phase d'intensification agricole est déjà atteinte. Après l'arrivée des premiers colons dans les années 1970, la culture du soja a connu une forte expansion. Au début des années 2000, alors que la majorité des terres exploitables étaient déjà cultivées, les producteurs ont orienté le développement vers l'adoption de nouvelles pratiques culturales plus productives. L'intensification agricole qui y est prônée se veut désormais respectueuse de l'environnement. En effet, après la « Révolution Verte » de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle dont l'objectif était d'augmenter les rendements en augmentant les intrants, parfois aux dépens de l'environnement, l'agriculture du 21^{ème} siècle rentre dans une phase d'intensification écologique. Cela se traduit notamment au Mato Grosso par l'adoption de nouvelles pratiques culturales telles que le semis direct (visant à réduire la pollution et l'érosion des sols), la diversification et la rotation des cultures, et le reboisement des berges de cours d'eau ou encore l'agriculture de précision.

De par sa capacité à structurer et faire émerger de nouveaux territoires comme l'ont fait par le passé la canne à sucre, l'or, le caoutchouc ou le café, le centre du Mato Grosso est marqué, et le restera, par le cycle du soja.

Les mutations territoriales en cours au Mato Grosso depuis plus de 30 ans sont donc très importantes. Elles s'observent notamment par la quantification et la qualification des

changements d'occupation et d'utilisation du sol. Les techniques de télédétection représentent l'outil le plus performant actuellement pour suivre ces changements. Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation EVI issues des données MODIS TERRA sont particulièrement efficaces pour la détection des couverts végétaux et des pratiques culturales. La méthodologie de classification proposée dans cette thèse fournit des résultats satisfaisants puisque, dans un premier temps, elle permet de détecter les surfaces agricoles avec une précision de 94,9% et, dans un deuxième temps, elle permet de détecter cinq grands types pratiques culturales avec une précision de 74,8%.

Dès lors, en appliquant cette méthodologie aux sept récoltes allant de 2000-2001 à 2006-2007, il devient possible de suivre l'évolution du front pionnier au Mato Grosso et de déterminer l'impact des activités humaines sur le milieu naturel. Le croisement des classifications d'occupation du sol avec les cartes de déforestation issues des données de la SEMA-MT et de l'INPE démontrent que l'expansion des cultures de soja est un facteur de déforestation. A l'échelle du Mato Grosso, 12% des surfaces déforestées entre 2000 et 2006 ont été converties en cultures mécanisées en moins de deux ans. Ce chiffre indique cependant qu'il existe d'autres facteurs de déforestation en Amazonie (l'élevage notamment) qui sont plus importants que l'expansion agricole. D'ailleurs, nos résultats démontrent que 71% de l'expansion agricole est en fait réalisée sur des terres anciennement déboisées. Néanmoins, il convient de préciser que cette réalité observée à l'échelle du Mato Grosso n'est pas forcément valable à l'échelle régionale. Dans la principale région agricole du Mato Grosso, le long de la BR-163, l'expansion agricole est bien le principal vecteur de déforestation. A l'inverse, dans la nouvelle région agricole située à l'est de l'Etat, l'expansion des cultures de soja se fait majoritairement sur des terres anciennement défrichées. On peut cependant supposer que cette expansion entraîne indirectement de la déforestation en forçant les anciens propriétaires à migrer vers l'avant du front pionnier.

La filière agricole semble avoir débuté aujourd'hui un passage vers une nouvelle phase de développement. Sur la période 2000-2007, l'expansion agricole n'explique plus que 54% de l'augmentation de la production agricole. Près de 50% de cette augmentation résulte donc d'une forte intensification agricole. Celle-ci s'observe également grâce aux classifications des données MODIS TERRA/EVI. La diversification se développe car les producteurs misent de plus en plus sur les cultures de maïs et de coton, semées en succession du soja. Cette pratique culturelle concerne aujourd'hui 30% des surfaces agricoles du Mato Grosso, contre 6% en 2000.

A l'échelle locale et régionale, l'analyse des dynamiques de déforestation, d'expansion et d'intensification agricole permet de proposer une cartographie du front pionnier et de son évolution. Celle-ci met en valeur une forte régionalisation des territoires du soja. Les régions agricoles du centre et de la Chapada dos Parecis sont en cours d'intensification et d'expansion agricole. La région Sud-Est base son développement sur une forte diversification liée à une importante production de coton. Enfin, la région Est, plus récente, est toujours en phase d'expansion agricole.

Cette régionalisation s'explique par des histoires de colonisation différentes. L'expansion agricole et la déforestation s'organisent surtout le long des axes routiers créés à des dates différentes par les pouvoirs publics. Toutefois, le milieu naturel, et notamment les conditions pluviométriques, influe également sur les changements d'occupation et d'utilisation du sol observés.

Les estimations de précipitations des données TRMM 3B42 sont adaptées pour mesurer des paramètres tels que le cumul annuel de précipitations et le début, la fin et la durée de la saison des pluies. Ceux-ci sont mis en relation avec les modes d'occupation de l'espace observés dans les principales régions agricoles. Nous démontrons à partir de tests statistiques d'indépendance qu'il existe une relation significative entre les conditions pluviométriques moyennes et le niveau d'intensification agricole. Plus la saison des pluies est longue et intense, plus les producteurs de soja peuvent adopter des pratiques culturales intensives comme les systèmes de production en double cultures commerciales. La région Est, où l'intensification agricole est encore peu développée, fait figure d'exception puisque les précipitations semblent suffisamment abondantes pour y réaliser deux récoltes. Il sera donc intéressant de suivre l'évolution de ce territoire agricole encore récent dans les années à venir.

En adaptant leurs pratiques par rapport aux conditions climatiques, les producteurs ont également accru leur vulnérabilité face aux aléas pluviométriques. Par exemple, en semant plus tôt dans le but de réaliser deux récoltes successives, les *fazendeiros* prennent le risque de perdre une partie de leurs rendements suite à des épisodes secs en phase de semis. Cependant, il est important de préciser que ce risque est calculé et jugé acceptable par les producteurs qui craignent davantage les oscillations des cours du soja et les maladies que les aléas climatiques.

Limites et perspectives

Cette thèse, basée sur l'application de techniques de télédétection pour l'observation des couverts végétaux et des précipitations, a donc mis en avant l'importance des relations nature / société au Mato Grosso. Cependant, les résultats obtenus ne sont pas exhaustifs. Certaines limites doivent être notées et exploitées pour ouvrir de nouvelles perspectives de recherche.

Tout d'abord, il convient de noter les limites associées aux données utilisées. La classification des séries temporelles de données MODIS TERRA/ EVI s'avère de bonne qualité. Toutefois, elle pourrait être améliorée par l'utilisation des images de la version 5 qui permettent de reconstruire des séries temporelles d'indices de végétation avec une résolution temporelle de 8 jours en combinant les données issues des plateformes TERRA et AQUA. De la même manière, une résolution temporelle plus fine devrait également permettre d'améliorer l'estimation des dates de semis. L'utilisation des données journalières (MOD09) apporterait une précision supérieure qu'il serait utile d'évaluer. Cela nécessiterait alors d'appliquer d'autres algorithmes de lissage des séries temporelles plus performants. Des travaux allant dans ce sens ont déjà été réalisés avec succès sur la Bretagne (Lecerf, 2008) et il serait donc intéressant d'évaluer les conditions de leur application au cas du Mato Grosso. A ce titre, Lecerf (2008) propose également de calculer des indices biophysiques à partir des séries temporelles d'images MODIS. Ces indices devraient être corrélés avec les données de rendements collectées sur le terrain afin de déterminer le potentiel des données MODIS pour l'estimation des rendements à échelle fine.

L'utilisation des produits TRMM 3B42 pour l'estimation des précipitations peut également être critiquée. Si la résolution spatiale de 0,25° est intéressante pour une étude à l'échelle régionale ou à l'échelle de la localité agraire, elle s'avère par contre limitée pour une étude à échelle fine. Elle est d'autant plus limitée que les précipitations d'origine convectives fréquentes au Mato Grosso sont très localisées. D'ailleurs, la phase de validation des données TRMM 3B42 avec les données des stations au sol confirme cette impression ainsi que la difficulté à détecter les jours pluvieux et non pluvieux. Dès lors, il faudrait s'intéresser à

d'autres produits d'estimations des précipitations. Les données GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) ont déjà été utilisées pour estimer les hauteurs de précipitations au Mato Grosso à l'échelle mensuelle et les résultats se sont avérés proches de ceux obtenus avec les données TRMM (Dubreuil *et al.*, 2004 ; Dubreuil *et al.*, 2007). Si ces résultats étaient validés à une résolution temporelle plus fine (1 ou 5 jours par exemple), la meilleure résolution spatiale des images GOES (4 km) permettrait d'affiner notre étude. Il serait également possible d'envisager l'implémentation de nouveaux algorithmes combinant les données TRMM et GOES (Berges et Chopin, 2005).

En ce qui concerne l'estimation des paramètres de la saison des pluies à partir des données TRMM 3B42 et des dates de semis et de récolte à partir des données MODIS TERRA/EVI, les méthodes choisies dans cette thèse sont celles qui ont donné les meilleurs résultats. Améliorer significativement ces résultats impliquerait donc surtout de changer de données d'entrée (données GOES et produits MOD09). Cependant, d'autres méthodes d'estimation de ces paramètres existent et mériteraient d'être testées.

Outre les limites des données utilisées, les méthodes choisies peuvent également être améliorées. La classification des séries temporelles de EVI montre par exemple des limites pour discriminer les classes « soja », « soja+culture non commerciale » et, dans une moindre mesure, « soja+maïs ». De nouveaux algorithmes de lissage et de classification doivent être testés : par exemple, le classificateur CAC (Cosine of the Angle Concept) proposé par South *et al.* (2004) devrait apporter des améliorations par rapport au classificateur Spectral Angle Mapper qui fournit des résultats intéressants, bien que légèrement inférieurs à ceux obtenus par le Maximum de Vraisemblance. Par ailleurs, d'autres méthodes de sélection et d'extraction de variables ainsi que d'autres critères de filtre en phase de post-classification peuvent être testés. En effet, dans la classification des surfaces agricoles, le fait de filtrer une classification à partir de règles de transitions avec les classifications des années précédentes et suivantes limite la possibilité d'un suivi en temps réel des changements d'occupation et d'utilisation du sol.

Par ailleurs, la méthode proposée pour cartographier le front pionnier est axée sur l'étude de la dynamique du soja au sein de ce front. Par conséquent, cette recherche s'est orientée vers la classification des surfaces agricoles dont l'expansion est considérée comme représentative du front économique. Or, il existe d'autres activités capitalistes au Mato Grosso qui servent de moteur au front pionnier et qui pourraient être insérées dans ce front économique. L'élevage est une de ces activités. Il faudrait donc réfléchir à une méthode de classification permettant l'observation des changements d'occupation du sol liés à cette activité. Pour cela, les séries temporelles d'indices de végétation s'avèrent limitées car elles sont très proches des séries observées (i) sur les *cerrados* et (ii) sur les exploitations d'agriculture traditionnelle (dans lesquelles quelques hectares sont souvent destinés à l'élevage). Il faudrait donc réfléchir à d'autres critères, tels que la texture et la structure d'objets issus de segmentations, afin de discriminer cette activité économique.

Enfin, cette thèse soulève des perspectives auxquelles de nouvelles recherches devront apporter des réponses.

La première perspective intègre une notion d'échelle. Il s'agirait d'appliquer la méthodologie présentée dans cette thèse à l'ensemble de l'Amazonie Légale. Après avoir régionalisé les territoires du soja au Mato Grosso, il s'agirait donc de régionaliser les fronts pionniers à l'échelle amazonienne. Cela permettrait de déterminer si la régionalisation de

l'occupation de l'Amazonie souhaitée par les gouvernements brésiliens à partir de la mise en place du second PIN en 1975 s'est traduite par des impacts environnementaux différents selon les activités développées. Un intérêt particulier devrait être porté à la région de Santarem au Para où la construction d'un port d'exportation par la multinationale Cargill en 2003 a entraîné une croissance des surfaces cultivées en soja (Valbuena, 2009).

De même, l'étude des paramètres pluviométriques à partir des produits TRMM 3B42 à l'échelle du bassin amazonien permettrait de cartographier les climats amazoniens et notamment de mieux évaluer les relations entre la saison des pluies et les phénomènes d'échelle globale du type ENSO. Cela soulèverait cependant des problèmes méthodologiques : (i) comment gérer le cas des régions où il existe deux saisons pluvieuses et (ii) quels seuils prendre en considération (les seuils fixés dans cette thèse sont en lien avec la culture du soja et n'ont donc pas d'intérêt particulier à l'échelle de l'Amazonie) ?

Les méthodes proposées pourraient en outre être appliquées à d'autres régions du globe et surtout de la zone inter-tropicale. Il serait notamment intéressant d'évaluer les possibilités d'adaptation de ces travaux à l'observation des fronts pionniers et des précipitations en Afrique.

La deuxième perspective d'étude concerne la thématique de recherche sur les fronts pionniers. La progression de la frontière agricole affecte l'environnement. Malgré tout, on observe un changement de mentalité chez les producteurs de soja qui commencent à adopter de nouvelles pratiques culturales plus respectueuses de l'environnement. Ceci est d'ailleurs confirmé par le fait que l'adoption de ces pratiques dépend, entre autres, des conditions naturelles et surtout des conditions pluviométriques. Il semblerait donc que le secteur agricole matogrossense soit en train de repenser le modèle de développement qui a caractérisé cette région du monde depuis plusieurs décennies. Il s'agit d'orienter ce modèle vers un plus grand respect de l'environnement sans porter atteinte au droit au développement socio-économique revendiqué par les populations, qu'elles soient traditionnelles ou migrantes. Les notions du développement durable prennent donc tout leur sens au Mato Grosso et il est à présent nécessaire de continuer à observer cette région pour évaluer si ce début de changement va se poursuivre ou si ce n'est qu'une réponse spontanée à la crise qui a touché les producteurs de soja entre 2004 et 2007. Si la première hypothèse venait à se vérifier, il se poserait alors la question de savoir quelles seront les prochaines phases de développement des territoires du soja. Par exemple, nous avons émis l'hypothèse que l'intensification agricole constituait la dernière phase de développement des territoires du soja au sein du front pionnier. Mais, est-il possible à présent de déterminer un critère objectif permettant d'affirmer qu'un territoire n'est plus en phase pionnière ? Quelle phase de développement suivra la phase d'intensification agricole ? Pour DeFries *et al.* (2004), lorsque la phase pionnière est terminée, le milieu naturel commence à reconquérir de l'espace comme c'est par exemple le cas en France où les surfaces forestières augmentent. Qu'en est-t'il du Mato Grosso ? Ce schéma, qui se veut général, est-il valable en Amazonie ? Par exemple, peut-on considérer que le fait que certains producteurs acceptent de financer des reboisements de berges de cours d'eau soit un signe de passage vers cette nouvelle phase de l'après front pionnier ? Le Mato Grosso deviendrait alors un espace à part dans le monde où, du fait de la rapidité des changements observés, des projets de reboisement (pour l'instant encore en nombre limité) s'installeraient à proximité d'un front de déforestation...

Enfin, la troisième perspective s'intègre également dans le cadre de l'étude des interactions nature / société et des changements globaux. A partir d'études approfondies sur

les quantités de produits phytosanitaires appliquées par cultures, il serait par exemple possible de déterminer l'impact des changements d'utilisation du sol sur la pollution des sols et des eaux. Cela permettrait d'initier de nouvelles recherches sur la santé ou sur la biodiversité. L'évolution de cette dernière pourrait également être étudiée à partir du suivi de la déforestation et des types d'utilisation du sol majoritaires. Enfin, il conviendrait d'évaluer l'impact de l'expansion agricole sur les cycles de l'eau et du carbone et donc d'évaluer indirectement l'impact de la déforestation sur le changement climatique. Selon Sampaio *et al.* (2007), l'expansion agricole entraîne une baisse des précipitations, surtout durant la saison sèche. Dès lors, si les dates de début des pluies venaient à être retardées, la vulnérabilité des producteurs intensifiant leur production augmenterait. Les conclusions émises sur l'hypothèse d'une phase d'équilibre entre les impacts environnementaux des activités anthropiques et les services écosystémiques seraient alors remises en question.

Références bibliographiques

- Aceituno, P. (1988), On the functioning of the southern oscillation in the South American sector: surface, climate. *Monthly Water Review*, **116**(3), 505–524.
- Achard, F., Eva, H. et Mayaux, P. (2001), Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data: production and accuracy assessment issues, *International Journal of Remote Sensing* **22**(14), 2741-2762.
- Achard, F., Eva, H., Stibig, H., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. et Malingreau, J. (2002), Determination of deforestation rates of the worlds humid tropical forests, *Science* **297**(5583), 999-1002.
- Ahl, D., Gower, S., Burrows, S., Shabanov, N., Myneni, R. et Knyazikhin, Y. (2006), Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS, *Remote Sensing of Environment* **104**(1), 88-95.
- Albaladejo, C., Duvernoy, I., Dominguez, C. et Veiga, I. (1996), « La construction du territoire sur les fronts pionniers », in Albaladejo, C. et Tulet, J.-C. (dir.), 1996 : *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. La formation de nouveaux territoires*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques Latines, Paris, pp. 247-278.
- Aldy, J., Hrubovcak, J. et Vasavada, U. (1998), The role of technology in sustaining agriculture and the environment, *Ecological Economics* **26**(1), 81-96.
- Alexander, A., List, J., Margolis, M. et d'Arge, R. (1998), A method for valuing global ecosystem services, *Ecological economics* **27**(2), 161-170.
- Alexandratos, N. (1999), World food and agriculture: outlook for the medium and longer term, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **96**(11), 5908-5914.
- Allen, R., Hanuschak, G. et Craig, M. (2002), History of Remote Sensing for Crop Acreage in USDA's National Agricultural Statistics Service.
Disponible à : http://www.nass.usda.gov/Surveys/Remotely_Sensed_Data_Crop_Acreage/index.asp
- Altieri, M. (1999), The ecological role of biodiversity in agroecosystems, *Agriculture, Ecosystems and Environment* **74**(1-3), 19-31.
- Anderson, L. O. (2004), Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS, Mémoire de *Mestrado* de l'Institut National de Recherches Spatiales (INPE), São Jose dos Campos, Brésil, 249 p.
- Anderson, L. O., Rojas, E. et Shimabukuro, Y. (2003), Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso, *Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte, Brésil, 19-25.
- Angelsen, A. et Kaimowitz, D. (2001a), *The role of agricultural technologies in tropical deforestation*, in Angelsen, A. et Kaimowitz, D. (dir.) (2001) : *Agricultural technologies and tropical deforestation*, Cabi Publishing, Royaume-Uni, pp. 1-17.
Disponible à : www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen0101E0.pdf
- Angelsen, A. et Kaimowitz, D. (2001b), *When does technological change in agriculture promote deforestation ?*, in Lee, D. R. et Barrett, C. B. (dir.) (2001) : *Tradeoffs or Synergies? Agricultural intensification, economic development and the environment*, CABI Publishing, Royaume-Uni, pp. 89-114.
- Arnauld de Sartre, X. (2003), *Territorialités contradictoires des jeunes ruraux amazoniens : mobilités paysannes ou sédentarités professionnelles ?*, Thèse de doctorat en Etudes Rurales de l'université de Toulouse le Mirail et de l'Université Fédérale du Para à Bélem, 537 p.
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M. S. P., Dubreuil, V., Lecerf, R. (2008a), Comparison of

- multitemporal MODIS-EVI smoothing algorithms and its contribution to crop monitoring, 2008 *IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Boston, Etats-Unis, 4 p.
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M. S. P. et Dubreuil, V. (2008b), Detecting outliers and asserting consistency in agriculture ground truth information by using temporal vi data from MODIS, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Pékin, Chine, 1031-1036.
- Atteia M. et Gaches J. (2003), *Approximation hilbertienne – Splines – Ondelettes – Fractales*, EDP Sciences, Grenoble, 160 p.
- Balme, M., Galle, S. et Lebel, T. (2005), Démarrage de la saison des pluies au Sahel: variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger, *Sécheresse*, **16**(1), 15-22.
- Baret F., Guyot G., Teres J. M., Rigal D. (1988), Profil spectral et estimation de la biomasse, *Signatures spectrales d'objets en télédétection, 4ème colloque international*, Aussois, France, 93-98
- Bariou, R. (1978), *Manuel de télédétection*, édition Sodipe S.A., Paris, 349 p.
- Bartholomé, E. et Belward, A. (2005), GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data, *International Journal of Remote Sensing* **26**(9), 1959-1977.
- Bastiaanssen, W. et Ali, S. (2003), A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan, *Agriculture, Ecosystems and Environment* **94**(3), 321-340.
- Beck, P., Atzberger, C., Hogda, K., Johansen, B. et Skidmore, A. (2006), Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI, *Remote Sensing of Environment*, **100**(3), 321-334.
- Becker, B. (2001), Amazonian frontiers at the beginning of the 21st Century, *Human Dimensions of Global Environmental Change: Brazilian Perspectives, Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciencias*, 299-324.
- Becker, B. (1986), Signification actuelle de la frontière: une interprétation géopolitique à partir du cas de l'Amazonie brésilienne, *Cahiers des sciences humaines* **22**(3-4), 297-317.
- Beltrando, G. (2004), *Les climats. Processus, variabilité et risques*, A. Colin, Paris, 266 p.
- Ben Gal, I. (2005), "Outlier detection", in Maimon, O. et Rokach, L. (dir.) (2005) : *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, Springer-Verlag, New York Inc, pp. 131-146.
- Béné, C. et Doyen, L. (2008), Contribution values of biodiversity to ecosystem performances: A viability perspective, *Ecological Economics* **68**(1-2), 14-23.
- Bergamasco, S. M. et Carmo, M. S. (1996), « Caractérisation et évolution agricole de l'Amazonie brésilienne, 1970-1990 », in Albaladejo, C. et Tulet, J.-C. (dir.), 1996 : *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. La formation de nouveaux territoires*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques Latines, Paris, pp. 45-63.
- Bergès, J.-C., Chopin, F. et Bessat, F. (2005), Satellite based downscaling algorithm for rainfall estimation, *IV Coloquio Brasileiro de Ciencias Geodesicas*, Curitiba, Brésil, 6 p.
- Bertrand, J. (2004), L'avancée fulgurante du complexe soja dans le Mato Grosso : facteurs clés et limites prévisibles, *Revue Tiers Monde* **45**(179), 567-594.
- Bertrand, J., Cadier, C. et Gasques, J. (2005), Le crédit: un des facteurs clés de l'expansion de la filière soja dans le Mato Grosso, *Cahiers Agricultures* **14**(1), 46-52.
- Bertrand, J.-P., De Mello, N. A., Riedacker, A., Théry, H., (2008), Brazilian policy for bio-resources uses : betting on ethanol. Economic advantages, environmental and social limits, *Economia e Diritto Agroalimentare*, **12**(3), 33-56.
- Bertrand, J.-P. (Coord.), Pasquis, R. (Corrdo.), de Mello, N. A., Bolzon, A., Cadier, C., Garcia

- Gasquez, J., Le Tourneau, F., Mendez, P., Piketty, M., Théry, H. et Wehrmann, M. (2004), *L'analyse des déterminants de l'avancée du front du soja en Amazonie brésilienne : la cas du Mato Grosso*, Rapport final d'une recherche financée par le Fonds commun INRA-Cirad et réalisée avec l'appui du Centre de recherche sur le développement durable (CDS) de l'Université de Brasilia. Paris: Inra/Cirad, 150 p.
- Beucher, S., Meyer, F. (1993), "The morphological approach to segmentation: the watershed transformation", in Dougherty, E. R. (dir.) (1993) : *Mathematical Morphology in Image Processing*, New York, pp. 443-481.
- Bigot, S. (2004), *Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales : l'exemple de la Côte d'Ivoire*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 398 p.
- Bigot, S., Brou, Y. T., Oszwald, J. et Diedhiou, A. (2005), Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales, *Sécheresse* **16**(1), 5-13.
- Bins, L., Fonseca, L., Erthal, G. (1996), Satellite imagery segmentation: a region growing approach., *Anais do VIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador da Bahia, Brésil, 677-680.
- Blaschke, T. et Strobl, J. (2001), Whats wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS, *GeoBIT/GIS* **6**, 12-17.
- Boom, B. (2002), The role of tropical forests as major sources of biological diversity, *Understanding and capturing the multiple values of tropical forests, Proceedings of the International Seminar on Valuation and Innovative Financing Mechanisms in support of conservation and sustainable management of tropical forest*, Wageningen, Pays-Bas, 37-41.
- Borlaug, N. (2000b), Ending world hunger. The promise of biotechnology and the threat of antiscience zealotry, *Plant Physiology* **124**(2), 487-490.
- Borlaug, N. (2000a), The green revolution revisited and the road ahead, *Special 30th Anniversary Lecture, The Norwegian Nobel Institute*, 23p.
Disponible au : http://nobelprize.org/nobel_prizes/peace/articles/borlaug/borlaug-lecture.pdf
- Boserup, E. (1970), *Évolution agraire et pression démographique*, Flammarion, Paris, 224 p.
- Bradley, B., Jacob, R., Hermance, J. et Mustard, J. (2007), A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data, *Remote Sensing of Environment* **106**(2), 137-145.
- Brahmananda Rao, V., Sá, L., Franchito, S. et Hada, K. (1997), Interannual variations of rainfall and corn yields in Northeast Brazil, *Agricultural and Forest Meteorology* **85**(1-2), 63-74.
- Brandão, A. J., Rezende, G. et Marques, R. (2006), Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente, *Economia Aplicada* **10**, 249-266.
- Brandão, A. et Souza C. J. (2006), Deforestation in Land Reform Settlements in the Amazon, *State of the Amazon, IMAZON*, **7**, 4 p.
Disponible à : <http://www.illegal-logging.info/uploads/Imazondeforestationlandreformsettlements.pdf>
- Brannstrom, C., Jepson, W., Filippi, A., Redo, D., Xu, Z. et Ganesh, S. (2008), Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986-2002: Comparative analysis and implications for land-use policy, *Land Use Policy* **25**(4), 579-595.
- Bravo-Ureta, B. et Pinheiro, A. (1993), Efficiency analysis of developing country agriculture: a review of the frontier function literature, *Agricultural and Resource Economics Review* **22**(1), 88-101.
- Brou, Y. (2005), *Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire*, Mémoire d'habilitation a diriger les recherches de Université des Sciences et Technologies de Lille, 212 p.
- Brou, Y. T., Akindès, F. et Bigot, S. (2005), La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions et réponses agricoles, *Cahiers Agricultures* **14**(6), 533-540.

- Brown, J., Jepson, W., Kastens, J., Wardlow, B., Lomas, J. et Price, K. (2007), Multitemporal, Moderate-Spatial-Resolution Remote Sensing of Modern Agricultural Production and Land Modification in the Brazilian Amazon, *GIScience et Remote Sensing* **44**(2), 117-148.
- Bruzzone, L. et Serpico, S. (2000), A technique for feature selection in multiclass problems, *International Journal of Remote Sensing* **21**(3), 549-563.
- Cadet, D. et Guillot, B. (1991), *EPSAT : Estimation des pluies par satellite*, ORSTOM, 63 p.
- Canévet, C. (1992), *Le modèle agricole breton: histoire et géographie d'une révolution agro-alimentaire*, Presses universitaires de Rennes, 397 p.
- Cantú-Paz, E., Newsam, S. et Kamath, C. (2004), Feature selection in scientific applications, *Proceedings of the tenth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, New York, Etats-Unis, 788-793.
- Cardille, J. et Foley, J. (2003), Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data, *Remote Sensing of Environment* **87**(4), 551-562.
- Carfagna, E. (2000), Remote Sensing Data in the Production of Land Cover Statistics, *Conference on Methodological Issues in Official Statistics, International Association of Survey Statistician, Swedish Statistical Association*, Stockholm, Suède, 8 p.
- Carfagna, E. et Gallego, F. (2005), Using remote sensing for agricultural statistics, *International Statistical Review* **73**(3), 389-404.
- Carfantan J.-Y. (1991), *Le soja*, Ed. Economica, Paris, 137p.
- Carr, D., Suter, L. et Barbieri, A. (2005), Population dynamics and tropical deforestation: State of the debate and conceptual challenges, *Population et Environment* **27**(1), 89-113.
- Carreiras, J., Pereira, J., Campagnolo, M. et Shimabukuro, Y. (2006a), Assessing the extent of agriculture/pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using SPOT VEGETATION data, *Remote sensing of environment* **101**(3), 283-298.
- Carreiras, J., Pereira, J. et Shimabukuro, Y. (2006b), Land-cover Mapping in the Brazilian Amazon Using SPOT-4 Vegetation Data and Machine Learning Classification Methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **72**(8), 897-910.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., et Liebmann, B. (2004), The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall, *Journal of Climate*, **17**(1), 88–108.
- Cassman, K. (1999), Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **96**(11), 5952-5959.
- Cerqueira Leite, R., Verde Leal, M., Barbosa Cortez, L., Griffin, W. et Gaya Scandiffio, M. (2009), Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol ?, *Energy*, **34**(5), 655-661.
- Chang, J., Hansen, M., Pittman, K., Carroll, M. et DiMiceli, C. (2007), Corn and Soybean Mapping in the United States Using MODIS Time-Series Data Sets, *Agronomy Journal* **99**(6), 1654-1664.
- Chen, J., Junsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B. et Eklundh, L. (2004), A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter, *Remote Sensing of Environment* **91**(3-4), 332-344.
- Chen, P., Fedosejevs, G., Tiscareco-López, M. et Arnold, J. (2006), Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI Composite Data Using Agricultural Measurements: An Example at Corn Fields in Western Mexico, *Environmental monitoring and assessment* **119**(1), 69-82.
- Clairay, M. (2003), *Études par télédétection des structures spatiales du front pionnier dans le Nord du Mato Grosso*, Thèse de doctorat en géographie de l'Université Rennes 2, 320 p.

- Clairay, M. (2005), Structures, composantes et formes spatiales d'un front pionnier situé au Mato Grosso, Brésil, *Mappemonde* **77**(1), 1-7.
- Cochrane, M. (2003), Fire science for rainforests, *Nature* **421**(6926), 913--919.
- Cochrane, M., Alencar, A., Schulze, M., Souza Jr, C., Nepstad, D., Lefebvre, P. et Davidson, E. (1999), Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests, *Science* **284**(5421), 1832-1835.
- Collischonn, B., Allasia, D., Collischonn, W. et Tucci, C. E. M (2007), Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior, *Revista Brasileira de Cartografia*, **59**, 93-99.
- Collischonn, B., Allasia, D., Collischonn, W. et Tucci, C. E. M. (2006), Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo : desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados, *Anais 1° simposio de geotecnologias no Pantanal*, Campo Grande, Brésil, 47-56.
- Congalton, R. (1988), A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **54**(5), 593-600.
- Congalton, R. (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote sensing of environment* **37**(1), 35-46.
- Congalton, R., Oderwald, R. et Mead, R. (1983), Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **49**, 1671-1678.
- Conway, G. et Toenniessen, G. (1999), Feeding the world in the twenty-first century, *Nature*, C55-C58.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. et Lambin, E. (2004), Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review, *International Journal of Remote Sensing* **25**(9), 1565-1596.
- Costa, M. et Foley, J. (1999), Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin, *Journal of Geophysical Research* **104**(D12), 14189-14198.
- Cox, P., Betts, R., Collins, M., Harris, P., Huntingford, C. et Jones, C. (2004), Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century, *Theoretical and Applied Climatology* **78**(1), 137-156.
- Coy, M. (1996), « Différenciation et transformation de l'espace au nord du Mato Grosso. Contribution a un modèle dynamique des fronts pionniers en Amazonie brésilienne », in Albaladejo, C. et Tulet, J.-C. (dir), 1996 : *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. La formation de nouveaux territoires*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques Latines, Paris, pp. 103-127.
- Cramer, W., Bondeau, A., Schaphoff, S., Lucht, W., Smith, B. et Sitch, S. (2004), Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation, *Philosophical Transactions: Biological Sciences* **359**(1443), 331-343.
- Curnel, Y. et Oger, R. (2006), Agrophénologie indicateurs from remote sensing : state of the art, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVI, No. 8/W48, ISPRS WG VIII/10 Workshop 2006, Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates*, Stresa, Italie, 7 p.
- D'Almeida, C., Vörösmarty, C., Hurtt, G., Marengo, J., Dingman, S. et Keim, B. (2007), The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: A review on scale and resolution, *International Journal of Climatology* **27**(5), 633-647.
- Dale, V. et Polasky, S. (2007), Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services, *Ecological Economics* **64**(2), 286-296.
- De Mello, N. A. et Théry, H. (2003), L'Etat brésilien et l'environnement en Amazonie: évolutions,

contradictions et conflits, *Espace Géographique* **32**(2003/1), 3-20.

DeFries, R., Foley, J. et Asner, G. (2004), Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function, *Frontiers in Ecology and the Environment* **2**(5), 249-257.

DeFries, R., Houghton, R., Hansen, M., Field, C., Skole, D. et Townshend, J. (2002), Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**(22), 14256-14261.

Didan, K. et Huete, A. (2006), *MODIS Vegetation Index Product Series. Collection 5 Change Summary*, University of Arizona. TBRS Lab, 17 p.

Doraiswamy, P., Akhmedov, B., Beard, L., DIV, D., Stern, A., Mueller, R. et DIV, D. (2007b), Operational prediction of crop yields using MODIS data and products, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5 p.

Doraiswamy, P., Moulin, S., Cook, P. et Stern, A. (2003), Crop yield assessment from remote sensing, *Photogrammetric engineering and remote sensing* **69**(6), 665-674.

Doraiswamy, P., Stern, A. et Akhmedov, B. (2007a), Crop classification in the US Corn Belt using MODIS imagery, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelone, Espagne, 4 p.

Droesbeke, J.J., Lejeune, M. et Saporta, M. (2006), *Analyse statistique des données spatiales*, Editions TECHNIP. Paris. 468 p.

Droulers, M. (1995), *L'Amazonie*, Editions Nathan-Univeristé, Collection Géographie d'aujourd'hui, 190 p.

Droulers, M. (2004), *L'Amazonie, vers un développement durable*, A. Colin, coll. U., Paris, 219 p.

Droulers, M. (2001), *Brésil: une géohistoire*, Presses universitaires de France, coll. Géographies, Paris, 306 p.

Droulers, M. et Le Tourneau, F. (2000), Amazonie, la fin d'une frontière ?, *Caravelle, Cahiers du Monde hispanique et luso-brésilien* **75**, 109-135.

Dubreuil, V. (2005), *Climats et pionniers du Mato Grosso*, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches de l'Université Rennes 2, 230 p.

Dubreuil, V., Arvor, D., Debortoli, N. et Rodrigues Filho, S. (2009), A utilização de dados SPOT Vegetação para evidenciar a expansão e a intensificação da agricultura no Mato Grosso, *Anais do XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brésil, 5773-5780.

Dubreuil, V., Arvor, D., Nédélec, V. et Maitelli, G. T. (2007), Comparação entre os dados TRMM, GOES e SPOT-VGT para a estimativa das chuvas em Mato Grosso, *Anais do XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianopolis, Brésil, 3849-3851.

Dubreuil, V., Bariou, R., Dos Passos, M., Ferrand, R. et Nédélec, V. (2005), Évolution de la frontière agricole dans le Centre-Ouest du Mato Grosso: municipes de Tangará da Serra, Campo Novo do Parecis, Diamantino, *Cahiers agricoles* **14**(2), 217-224.

Dubreuil, V., Jallet, A., Ronchail, J. et Maitelli, G. (2004), Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil), *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, **1**, 133-156.

Dubreuil, V., Laques, A., Nédélec, V., Arvor, D. et Gurgel, H. (2008), Paysages et fronts pionniers amazoniens sous le regard des satellites: l'exemple du Mato Grosso, *Espace Géographique*, **37**(1), 57-74.

Dubreuil, V., Zamparoni, C. A. G. P., Clairay, M., Maciel, E., Garcia Neto, L. et Bittencourt Rosa, D. (2002), « Apports des satellites météorologiques à l'étude des paysages et de la déforestation », in Dubreuil, V. (dir.) (2002) : *Environnement et télédétection au Brésil.*, Presses Universitaires de Rennes, pp. 31-41.

Ducos, A. (2003), *Agricultural Land Classification in the State Op Mato Grosso (Brazil) with a Tree*

- Classifier: Using the MODIS EVI Vegetation Index*, Mémoire de Master de l'Université de Wageningen, Pays-Bas, 27 p.
- Durieux, L. (2002), *Etude des relations entre les caractéristiques géographiques de la surface et les nuages convectifs dans la région de l'arc de déforestation en Amazonie*, Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille I, 279 p.
- Durieux, L., Machado, L. et Laurent, H. (2003), The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation, *Remote Sensing of Environment* **86**(1), 132-140.
- Durieux, L., Yi, J., da Silva Moreira, F., Dessay, N. et Shimabukuro, Y. (2001), Fuzzy classification by region of segmented NOAA-AVHRR images and multisource data, *Anais do X Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Igauçu, Brésil, 1585-1587.
- Eltahir, E. et Bras, R. (1996), Precipitation recycling, *Reviews of Geophysics* **34**(3), 367-378.
- Embrapa (2004), *Tecnologias de produção de soja – Região central do Brasil 2005*, 242 p.
Disponible à : http://www.cnpsa.embrapa.br/download/publicacao/central_2005.pdf
- Erickson, J. (1984), The LACIE experiment in satellite aided monitoring of global crop production, in Woodwell G. M. (dir.) (1984) : *The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurements by Remote Sensing*, Wiley, Chichester, pp. 191-217.
- Espinoza Villar, J. C. (2009), *Impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie du bassin amazonien*, Thèse de Doctorat en Sciences de l'Environnement de l'Université Paris 6 – Pierre et Marie Curie, 203 p.
- Eva, H., Belward, A., De Miranda, E., Di Bella, C., Gond, V., Huber, O., Jones, S., Sgrenzaroli, M. et Fritz, S. (2004), A land cover map of South America, *Global Change Biology* **10**(5), 731-744.
- FAO (2007), State of the world's forests 2007, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 144 p.
- Fearnside, P. M. (1999), Biodiversidade nas florestas Amazônicas brasileiras: Riscos, valores e conservação, *Holos (edição especial)*, 35-59.
- Fearnside, P. M. (2005b), Carga pesada: O custo ambiental de asfaltar um corredor de soja na Amazônia, *Amazônia Revelada: os descaminhos ao longo da BR-163*, 397-423.
- Fearnside, P. M. (2006), Containing destruction from Brazils Amazon highways: now is the time to give weight to the environment in decision-making, *Environmental Conservation* **33**(03), 181-183.
- Fearnside, P. M. (2005a), Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences., *Conservation Biology* **19**(3), 680-688.
- Fearnside, P. M. (1997c), Environmental services as a strategy for sustainable development in rural Amazonia, *Ecological Economics* **20**(1), 53-70.
- Fearnside, P. M. (1997b), Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions, *Climatic Change* **35**(3), 321-360.
- Fearnside, P. M. (2001), Land-tenure issues as factors in environmental destruction in Brazilian Amazonia: The case of southern Pará, *World Development* **29**(8), 1361-1372.
- Fearnside, P. M. (2002), Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil, *Environmental Conservation* **28**(1), 23-38.
- Fearnside, P. M. (1997a), The main resources of Amazonia, XX International Congress of the Latin American Studies Association (LASA), Guadalajara, Mexico, 28 p.
Disponible à : <http://lasa.international.pitt.edu/LASA97/fearnside.pdf>
- Fearnside, P. M. et Guimarães, W. (1996), Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia, *Forest Ecology and Management* **80**(1-3), 35-46.
- Fearnside, P. M. et Laurance, W. (2003), Comment on "Determination of deforestation rates of the

- worlds humid tropical forests", *Science* **299**(5609), 1015-1015.
- Ferreira, L. et Huete, A. (2004), Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices, *International Journal of Remote Sensing* **25**(10), 1837-1860.
- Ferreira, L., Yoshioka, H., Huete, A. et Sano, E. (2003), Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia(LBA), *Remote Sensing of Environment* **87**(4), 534-550.
- Figueroa, S. N. et Nobre, C. A. (1990), Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanalise*, **6**, 36 – 40.
- Fischer, A. (1994), A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters, *Remote sensing of environment*, **48**(2), 220-230.
- Fontana, D., Weber, E., Ducati, J., Berlatto, M., Guasselli, L. et Gusso, A. (2002), Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante La Niña de 1998/2000, *Revista Brasileira de Agrometeorologia* **10**, 343-351.
- Foody, G. M. (2002), Status of land cover classification accuracy assessment, *Remote Sensing of Environment* **80**(1), 185-201.
- Foody, G. M. (2006), The evaluation and comparison of thematic maps derived from remote sensing, *7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Lisbonne, Portugal, 14p.
- Foody, G. M. (2004), Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy, *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* **70**(5), 627-633.
- Foody, G. M. et Hill, R. (1996), Classification of tropical forest classes from Landsat TM data., *International Journal of Remote Sensing* **17**(12), 2353-2367.
- Foucher, M. (1991), *Fronts et frontières: Un tour du monde géopolitique*, 2^{ème} édition, Fayard, Paris, 691 p.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. et Schaaf, C. (2002), Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results, *Remote Sensing of Environment* **83**(1), 287--302.
- Fritz, S., Massart, M., Savin, I., Gallego, J. et Rembold, F. (2008), The use of MODIS data to derive acreage estimations for larger fields: A case study in the south-western Rostov region of Russia, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* **10**(4), 453-466.
- Galford, G., Mustard, J., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C. et Cerri, C. (2008), Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil, *Remote Sensing of Environment* **112**(2), 576-587.
- Gallego, F. J. (1999), Crop area estimation in the MARS project, *Conference on ten years of the MARS Project*, Bruxelles, Belgique, 11 p.
- Gallego, F. J. (2006), Review of the main remote sensing methods for crop area estimates, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVI, No. 8/W48, ISPRS WG VIII/10 Workshop 2006, Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates*, Stresa, Italie, 65-70.
- Gan, M. A., Kousky, V. E. et Ropelewski, C. F. (2004), The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil, *American Meteorological Society*, **17**(1), 47-66.
- Garreaud, R. D. (2000), Cold air incursions over Subtropical South America: Mean structure and dynamics, *Monthly Weather Review*, **128**(7), 2544-2559.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J. (2008), Present-day South American

- climate, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, in Press, 35 p.
- Garreaud, R. D. et Wallace, J. M. (1998), Summertime incursions of mid-latitude air into subtropical and tropical South America, *Monthly Weather Review*, **126**(10), 2713–2733.
- Geist, H. et Lambin, E. (2001), *What drives tropical deforestation ? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*, LUCR Report series No. 4, 136 p.
- Girard, M.C., Girard, C.M. (1999), *Traitement des données de télédétection*, Dunod Ed. Paris, 529 p.
- Gomes de Oliveira, L. L. (2006), *O crescimento da produção da soja brasileira na última década no estado de Mato Grosso e o seu impacto sobre o patrimônio florestal estadual*, Mémoire de Mestrado de l'Université Fédérale du Mato Grosso, 58 p.
- Grimes, D. I. F., Pardo-Iguzquiza, E. et Bonifacio, R. (1999), Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data, *Journal of Hydrology*, **222**(1-4), 93-108.
- Grimm, A. M. (2003), The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil : regional processes versus remote influences, *Journal of Climate*, **16**(2), 263-280.
- Grimm, A. M. (2004), How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil ?, *Climate Dynamics*, **22**(2-3), 123-138.
- Guillot, B. (1996), *Problèmes de validation des méthodes d'estimation des précipitations par satellite en Afrique Intertropicale*. IRD, 228 p.
- Gurgel, H. et Ferreira, N. (2003), Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate, *International Journal of Remote Sensing* **24**(18), 3595-3609.
- Guyon, I. et Elisseeff, A. (2003), An introduction to variable and feature selection, *The Journal of Machine Learning Research* **3**, 1157-1182.
- Guyot, G. (1983), Relations existant entre les propriétés spectrales des couverts végétaux et leur état biologique : conséquences pour la prévision des rendements par télédétection. *Les colloques de l'INRA : Applications de la télédétection à l'agriculture*, 221-236.
- Hansen, M. et Reed, B. (2000), A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products, *International Journal of Remote Sensing* **21**(6), 1365-1373.
- Hansen, M., Shimabukuro, Y., Potapov, P. et Pittman, K. (2008), Comparing annual MODIS and PRODES forest cover change data for advancing monitoring of Brazilian forest cover, *Remote Sensing of Environment* **112**(10), 3784-3793.
- Hecht, S. (2005), Soybeans, development and conservation on the Amazon frontier, *Development and Change* **36**(2), 375-404.
- Hoban, T. J. (1998), Trends in consumer attitudes about agricultural biotechnology, *AgBioForum* **1**(1), 3-7.
- Holben, B. (1986), Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing* **7**(11), 1417-1434.
- Houghton, R. (2003), Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different ?, *Global change biology* **9**(4), 500-509.
- Houseman, E. et Becker, J. (1967), A Centenary Profile of Methods for Agricultural Surveys, *American Statistician* **21**, 15-21.
- Hubert-Moy, L., Clairay, M., Lesne, F., Bariou, R., Moreno, G. (2002), « Schéma de mise en valeur des terres dans le cerrado : étude par télédétection du municípe de Sorriso ». In : Dubreuil, V. (dir.), 2002 : *Environnement et télédétection au Brésil.*, Presses Universitaires de Rennes, pp. 123-130.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. et Ferreira, L. G. (2002), Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of*

Environment **83**(1-2), 195-213.

Huete, A., Justice, C. et Van Leeuwen, W. (1999), *Modis vegetation index (MOD13) Algorithm theoretical basis document, version 3.*, University of Arizona, 129 p.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolph, B. et Schneider, U. (1995a), The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**, 5-20.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F. et Wolff, D. B. (2007), The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of hydrometeorology*, **8**, 38-55.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Rudolph, B., Schneider, U. et Keehn, P. (1995b), Global Precipitation Estimates Based on a Technique for Combining Satellite-Based Estimates, Rain Gauge Analysis, and NWP Model Precipitation Information. *Journal of Climate*, **8**, 1284-1295.

Hung, T. et Yoshifumi, Y. (2005), MODIS Applications in Environmental Change Researches in the Southeast-Asian Region, *International Journal of Geoinformatics* **1**(1), 117-123.

IBGE (2002), *Pesquisas Agropecuarias, Série Relatorios Metodologicos*, vol. 6, 2^a edição, Rio de Janeiro, 96 p.

Islam, M. et Uyeda, H. (2007), Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh, *Remote Sensing of Environment* **108**(3), 264-276.

Jakubauskas, M., Legates, D. et Kastens, J. (2002), Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data, *Computers and Electronics in Agriculture* **37**(1-3), 127-139.

Jallet, A. (2001), *Apport de l'imagerie infrarouge GOES à la répartition spatiale des précipitations au Mato Grosso (Brésil) de Septembre 1999 à Août 2000*, Mémoire de maîtrise de Géographie de l'Université Rennes 2, 108 p.

Jasinski, E., Morton, D., DeFries, R., Shimabukuro, Y., Anderson, L. et Hansen, M. (2005), Physical Landscape Correlates of the Expansion of Mechanized Agriculture in Mato Grosso, Brazil, *Earth Interactions* **9**(16), 1-18.

Jelinski, D. et Wu, J. (1996), The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology, *Landscape Ecology* **11**(3), 129-140.

Jepson, W. (2005), A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in the Brazilian savanna, *The Geographical Journal* **171**(2), 99-111.

Jepson, W. (2006), Private agricultural colonization on a Brazilian frontier, 1970-1980, *Journal of Historical Geography* **32**(4), 839-863.

Jobard, I. (2001), Status of satellite retrieval of rainfall at different scales using multi-source data, *Megha-Tropiques 2nd Scientific Workshop*, Paris, France, 10 p.

Johnson, B. (1999), Genetically modified crops and other organisms: Implications for agricultural sustainability and biodiversity, *Agricultural Biotechnology and the Poor: Proceedings of an International Conference*, Washington, DC, Etats-Unis, 131-138.

Jonathan, M. (2005), *Classificação do uso e cobertura do solo em escala regional a partir de seqüências temporais de dados MODIS*, Mémoire de Mestrado en Géomatique de l'Université de l'Etat de Rio de Janeiro, 147 p.

Jonsson, P. et Eklundh, L. (2002), Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **40**(8), 1824-1832.

Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J. et Baret, F. (2000), Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface, *International Journal of Remote Sensing* **21**(17), 3383-3390.

- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N. et Tucker, C. J. (1985), Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *International Journal of Remote Sensing* **6**(8), 1271-1318.
- Kass, G. (1980), An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data, *Applied statistics*, **29**(2), 119-127.
- Klink, C. et Machado, R. (2005), Conservation of the Brazilian Cerrado, *Conservation Biology* **19**(3), 707-713.
- Klisch, A., Royer, A., Lazar, C., Baruth, B. et Genovese, G. (2006), Extraction of phenological parameters from temporally smoothed vegetation indices, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVI, No. 8/W48, ISPRS WG VIII/10 Workshop 2006, Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates*, Stresa, Italie, 5 p.
- Knight, J., Lunetta, R., Ediriwickrema, J. et Khorram, S. (2006), Regional scale land cover characterization using MODIS-NDVI 250 m multi-temporal imagery: a phenology-based approach, *GIScience et Remote Sensing* **43**(1), 1-23.
- Kohavi, R. et John, G. (1997), Wrappers for feature subset selection, *Artificial intelligence* **97**(1-2), 273-324.
- Kummerow, C., Simpson, J., Thiele, O., Barnes, W., Chang, A., Stocker, E., Adler, R., Hou, A., Kakar, R., Wentz, F., Ashcroft, P., Kozu, T., HONG, Y., Okamoto, K., Iguchi, T., Kuroiwa, H., Im, E., Haddad, Z., Huffman, G., Ferrier, B., OLSON, W. S., Zipser, E., Smith, E. A., Wilheit, T. T., North, G., Krishnamurti, T. et Nakamura, K. (2000), The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit, *Journal of Applied Meteorology* **39**(12), 1965-1982.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C. et Xu, J. (2001), The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths, *Global Environmental Change* **11**, 261-269.
- Laques, A.-E. (2003), « Paysages et modèles paysagers: des indicateurs géographiques pour l'analyse des dynamiques spatio-temporelles d'un front pionnier », in *Objets et indicateurs géographiques*, UMR Espace, Actes Avignon n°5, pp. 109-120.
- Laurance, W. (1999), Reflections on the tropical deforestation crisis, *Biological Conservation* **91**(2-3), 109-117.
- Laurance, W., Albernaz, A., Schroth, G., Fearnside, P., Bergen, S., Venticinque, E. et Da Costa, C. (2002), Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon, *Journal of biogeography* **29**(5-6), 737-748.
- Laurance, W., Cochrane, M., Bergen, S., Fearnside, P., Delamonica, P., Barber, C., D'Angelo, S. et Fernandes, T. (2001), The future of the Brazilian Amazon, *Science* **291**(5503), 438-439.
- Laurent, H., Jobard, I. et Toma, A. (1998), Validation of satellite and ground-based estimates of precipitation over the Sahel, *Atmospheric Research* **47**, 651-670.
- Le Borgne-David, A. (1998), Les migrations paysannes du Sud-Brésil vers l'Amazonie. Le salariat plutôt que la Malaria, L'Harmattan, Paris, 220 p.
- Le Tourneau, F.-M. (2006), Enjeux et conflits autour des territoires amérindiens en Amazonie brésilienne, *Problèmes d'Amérique latine* **60**, 71-91.
- Le Tourneau, F.-M. (2004), Jusqu'au bout de la forêt? Causes et mécanismes de la déforestation en Amazonie brésilienne, *Mappemonde* **75**, 1-25.
- Lecerf, R. (2008), *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne)*,

Thèse de Doctorat en Géographie de l'Université Rennes2, 326 p.

Leff, B., Ramankutty, N. et Foley, J. (2004), Geographic distribution of major crops across the world, *Global Biogeochemical Cycles* **18**(GB1009), 27 p.

Léna, P. (1986), Aspects de la frontière amazonienne. *Cahiers des Sciences humaines* **22**(3-4), 319-343.

Lepers, E., Lambin, E., Janetos, A., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N. et Scholes, R. (2005), A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000, *BioScience* **55**(2), 115-124.

Lewinsohn, T. et Prado, P. (2005), How Many Species Are There in Brazil ?, *Conservation Biology* **19**(3), 619-624.

Liebmann, B. (2006), A definition for onset and end of the rainy season.

Disponible à : www.eol.ucar.edu/projects/cppa/meetings/200608/posters/brant.pdf

Liebmann, B., Camargo, S., Seth, A., Marengo, J., Carvalho, L., Allured, D., Fu, R. et Vera, C. (2007), Onset and end of the rainy season in South America in observations and the ECHAM 4.5 atmospheric general circulation model, *Journal of Climate* **20**(10), 2037-2050.

Liebmann, B. et Marengo, J. (2001), Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin, *Journal of Climate* **14**(22), 4308-4318.

Lillesand, T., Kiefer, R. (1987), *Remote sensing and image interpretation.*, 2de édition, John Wiley et Sons Ltd, Chichester, Royaume-Uni, 736 p.

Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Torezan, J., Rudorff, B., Rizzi, R., Epiphanyo, J., Galvão, L. et Fonseca, L. (2007), Atualização cartográfica do mapa de cobertura do Mato Grosso através da integração de mapas provenientes de imagens TM e MODIS, *Anais do XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianopolis, Brésil, 1711-1717.

Line Carpentier, C., Vosti, S. et Witcover, J. (2000), Intensified production systems on western Brazilian Amazon settlement farms: could they save the forest ?, *Agriculture, Ecosystems and Environment* **82**(1-3), 73-88.

Lobell, D. et Asner, G. (2004), Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data, *Remote sensing of environment* **93**(3), 412-422.

Loveland, T., Reed, B., Brown, J., Ohlen, D., Zhu, Z., Yang, L. et Merchant, J. (2000), Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing* **21**(6), 1303-1330.

Lu, D., Moran, E. et Batistella, M. (2003), Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification, *Remote Sensing of Environment* **87**(4), 456-469.

Lucas, R., Xiao, X., Hagen, S. et Frohling, S. (2002), Evaluating TERRA-1 MODIS data for discrimination of tropical secondary forest regeneration stages in the Brazilian Legal Amazon, *Geophysical Research Letters* **29**(8), 42-1.

Lunetta, R., Congalton, R., Fenstermaker, L., Jensen, J. et McGwire, K. (1991), Remote sensing and geographic information system data integration - Error sources and research issues, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **57**, 677-687.

Lunetta, R., Knight, J., Ediriwickrema, J., Lyon, J. et Worthy, L. (2006), Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data, *Remote Sensing of Environment* **105**(2), 142-154.

Ma, M. et Veroustraete, F. (2006), Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China, *Advances in Space Research* **37**(4), 835-840.

Maignan, F., Bréon, F., Bacour, C., Demarty, J. et Poirson, A. (2008), Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements Comparison with in situ data and applications, *Remote Sensing of Environment* **112**(2), 496-505.

- Makarieva, A., Gorshkov, V. et Li, B. (2009), Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture, *Ecological Complexity*, in Press, 6 p.
- Malet, P. (1983), Apport de la télédétection dans les modèles agrométéorologiques d'estimation et de suivi des productions végétales, *Les colloques de l'INRA : Applications de la télédétection à l'agriculture*, 200-220.
- Malhi, Y. et Grace, J. (2000), Tropical forests and atmospheric carbon dioxide, *Trends in Ecology et Evolution* **15**(8), 332-337.
- Malingreau, J.-P. (1987), The vegetation index and the study of vegetation dynamics, *Applications of Remote Sensing to agrometeorology*, 285-303
- Marengo, J. A. (2005), Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget, *Climate Dynamics* **24**(1), 11-22.
- Marengo, J. A. (1992), Interannual variability of surface climate in the Amazon basin, *International Journal of Climatology*, **12**(8), 853-863.
- Marengo, J. A. (2006), On the hydrological cycle of the amazon basin: a historical review and current state-of-the-art, *Revista Brasileira de Meteorologia* **21**(3), 1-19.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Kousky, V., Filizola, N. et Wainer, I. (2001), Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin, *Journal of Climate* **14**(5), 833-852.
- Martorano, L. G., Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., de Faria, R. T., Mielniczuk, J. and Comiran, F. (2009), Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **13**(4), 404-412.
- Mas, J. (1999), Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing* **20**(1), 139-152.
- Matson, P., Parton, W., Power, A. et Swift, M. (1997), Agricultural intensification and ecosystem properties, *Science* **277**(5325), 504-509.
- Mayaux, P., Gond, V. et Bartholome, E. (2000), A near-real time forest-cover map of Madagascar derived from SPOT-4 VEGETATION data, *International Journal of Remote Sensing* **21**(16), 3139-3144.
- Mayaux, P., Holmgren, P., Achard, F., Eva, H., Stibig, H. et Branthomme, A. (2005), Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**(1454), 373-384.
- Meinel, G., Neubert, M. (2004), A Comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data, *International Archives of the Photogrammetric Remote Sensing Spatial Information Science XXXV-B4*, Istanbul, Turquie, 1097-1102.
- Mendez del Villar, P., Ferreira, C. M. (2005), Dynamiques territoriales de la culture du riz pluvial, *Cahiers Agricultures* **14**(1), 40-45.
- Mendez del Villar, P., Ferreira, C. M., Ribeiro, J., Madeiros, J., Lubello, P., Le Guérroué, J.-L., Fok, M. (2007), Private governance in royalty collection. Effectiveness and limitations in tracing GM soybean in Brazil, *GMCC-07 Conference*, Séville, Espagne, 2 p.
- Mendez del Villar, P., Nédélec, V., Ferreira, C. M., de Mello N. A., Dubreuil V.,(2005): *Impacto do projeto de asfaltamento da BR-163: Perspectivas da sociedade e setor produtivo agrícola ao longo do eixo da Cuiabá-Santarém*, Brasília, DF, Brésil, 121 p.
- Mingwei, Z., Qingbo, Z., Zhongxin, C., Jia, L., Yong, Z. et Chongfa, C. (2008), Crop discrimination in Northern China with double cropping systems using Fourier analysis of time-series MODIS data, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* **10**(4), 476-485.
- Mittermeier, R., Mittermeier, C., Brooks, T., Pilgrim, J., Konstant, W., Da Fonseca, G. et Kormos, C. (2003), Wilderness and biodiversity conservation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*

100(18), 10309-10313.

Molion, L. (1975), *A Climatologic Study of the Energy and Moisture Fluxes of the Amazonas Basin with Considerations of Deforestation Effects*, Thèse de doctorat en Philosophie (Meteorology) de l'Université de Wisconsin, Madison, Etats-Unis, 141 p.

Monbeig, P. (1952), *Pionniers et planteurs de São Paulo*, Cahiers de la Fondation Nationale des Sciences Politiques, A. Colin, Paris, 374 p.

Moran, M., Inoue, Y., Barnes, E. et USDA, A. (1997), Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management, *Remote Sensing of Environment*, **61**(3), 319-346.

Moreno, G. et Higa, T. (2005), *Geografia de Mato Grosso: território, sociedade, ambiente*, Ed. Entrelinhas, Cuiaba, 285 p.

Morissette, J., Pinzon, J., Brown, M., Tucker, C. et Justice, C. (2004), Initial Validation of NDVI time series from AVHRR, VEGETATION, and MODIS, *Proceedings of the 2nd International VEGETATION User Conference*, Anvers, Belgique, 149-154.

Morton, D., DeFries, R., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Arai, E., del Bon Espirito-Santo, F., Freitas, R. et Morissette, J. (2006), Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**(39), 14637-14641.

Morton, D., DeFries, R., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Del Bon Espirito-Santo, F., Hansen, M. et Carroll, M. (2005), Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data, *Earth Interactions* **9**(8), 1-22.

Moulin, S., Kergoat, L., Viovy, N. et Dedieu, G. (1997), Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements, *Journal of Climate* **10**(6), 1154-1170.

Mustard, J., DeFries, R., Fisher, T. et Moran, E. (2004), "Land use and land cover change pathways and impacts", in *Land change science. Observing, monitoring, and understanding trajectories of change on the Earth's surface, volume 6*, Springer-Verlag, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 411-429.

Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., da Fonseca, G. et Kent, J. (2000), Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature* **403**, 853-858.

Nédélec, V. (2005), *Modélisation de la colonisation agricole et de la déforestation dans le nord du Mato Grosso : approche multiscalaire par télédétection*, Thèse de doctorat en géographie de l'Université Rennes 2 et de l'Université de Brasilia, 294 p.

Nepstad, D., Carvalho, G., Cristina Barros, A., Alencar, A., Paulo Capobianco, J., Bishop, J., Moutinho, P., Lefebvre, P., Lopes Silva, U. et Prins, E. (2001), Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests, *Forest Ecology and Management* **154**(3), 395-407.

Nepstad, D., Schwartzman, S., Bamberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., Lefebvre, P., Alencar, A., Prinz, E., Fiske, G. et Rolla, A. (2006b), Inhibition of Amazon Deforestation and Fire by Parks and Indigenous Lands, *Conservation Biology* **20**(1), 65-73.

Nepstad, D., Stickler, C. et ALMEIDA, O. (2006a), Globalization of the Amazon Soy and Beef Industries: Opportunities for Conservation., *Conservation Biology* **20**(6), 1595-1603.

Nobre, C. (2002), Amazonian tropical forests ; carbon source or sink ? *Understanding and capturing the multiple values of tropical forests, Proceedings of the International Seminar on Valuation and Innovative Financing Mechanisms in support of conservation and sustainable management of tropical forest*, Wageningen, Pays-Bas, 43-48.

Nobre, C., Sellers, P. et Shukla, J. (1991), Amazonian deforestation and regional climate change, *Journal of Climate* **4**(10), 957-988.

Nogués-Peagle, J. et Mo, K. C. (1997), Alternating wet and dry conditions over South America in summer, *Monthly Weather Review*, **125**, 279-291.

Odekunle, T. (2006), Determining rainy season onset and retreat over Nigeria from precipitation

- amount and number of rainy days, *Theoretical and Applied Climatology* **83**(1), 193-201.
- Oki, T. et Kanae, S. (2006), Global hydrological cycles and world water resources, *Science* **313**(5790), 1068-1072.
- Ometto, J., Nobre, A., Rocha, H., Artaxo, P. et Martinelli, L. (2005), Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned, *Oecologia* **143**(4), 483-500.
- Ortiz-Monasterio, J. et Lobell, D. (2007), Remote sensing assessment of regional yield losses due to sub-optimal planting dates and fallow period weed management, *Field Crops Research* **101**(1), 80-87.
- Oruc, M., Marangoz, A. et Buyuksalih, G. (2004), Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands, *Proceedings of ISRPS Annual Conference*, Amsterdam, Pays-bas, 1118-1122.
- Penny, K. et Jolliffe, I. (2001), A comparison of multivariate outlier detection methods for clinical laboratory safety data, *The Statistician* **50**, 295-308.
- Pereira, S.R. (2004), A evolução do complexo soja e a questão da transgenia, *Revista de politica Agricola*, 7 p.
- Persley, G. et Siedow, J. (1999), Applications of biotechnology to crops: Benefits and risks, CAST-Council for Agricultural Science and Technology, **12**, 8 p.
Disponble à : http://www.cast-science.org/websiteUploads/publicationPDFs/biotc_ip.pdf
- Pettorelli, N., Vik, J., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C. et Stenseth, N. (2005), Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology et Evolution* **20**(9), 503-510.
- Petty, G. (1995), The status of satellite-based rainfall estimation over land, *Remote sensing of environment* **51**(1), 125-137.
- Pimm, S. et Raven, P. (2000), Biodiversity: extinction by numbers, *Nature* **403**(6772), 843-845.
- Pimm, S., Russell, G., Gittleman, J. et Brooks, T. (1995), The future of biodiversity, *Science* **269**(5222), 347-350.
- Pinter, P., Hatfield, J., Schepers, J., Barnes, E., Moran, M., Daughtry, C. et Upchurch, D. (2003), Remote sensing for crop management, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **69**(6), 647-664.
- Ponzoni, F., Galvão, L. et Epiphanyo, J. (2002), Spatial resolution influence on the identification of land cover classes in the Amazon environment, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **74**, 717-725.
- Ponzoni, F. et Shimabukuro, Y. (2007), Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação, *A. Silva Vieira Ed., SP, São José dos Campos*, 135 p.
- PPA 2008-2011 (2007), *Plano Pluriannual 2008-2011. Desenvolvimento com inclusão social e educação de qualidade*, Volume 1, Message présidentiel, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão et Secretaria De Planejamento e Investimentos Estratégicos, 16 p.
- Prasad, A., Chai, L., Singh, R. et Kafatos, M. (2006), Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* **8**(1), 26-33.
- Quinlan, J. (1996), Improved use of continuous attributes in C4. 5, *Journal of Artificial Intelligence Research.*, **4**, 77-90.
- RADAMBRASIL (1982), *Levantamento de recursos naturais*, **26**, Rio de Janeiro.
- Rakotomalala, R. (2005), Arbres de decision, *Revue Modulad* **33**, 163-187.

- Ratisbona, L. R. (1976), "The climate of Brazil", in Schwerdtfeger (dir.) (1976) : *Climates of Central and South America, World Survey of Climatology*, Elsevier Scientific publishing Company **12**, pp. 219-293.
- Reed, B., Brown, J., VanderZee, D., Loveland, T., Merchant, J. et Ohlen, D. (1994), Measuring phenological variability from satellite imagery, *Journal of Vegetation Science* **5**, 703-714.
- Rembold, F. et Maselli, F. (2006), Estimation of inter-annual crop area variation by the application of spectral angle mapping to low resolution multitemporal NDVI images, *Photogrammetric engineering and remote sensing* **72**(1), 55-62.
- Ren, J., Chen, Z., Zhou, Q. et Tang, H. (2008), Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* **10**(4), 403-413.
- Richey, J., Melack, J., Aufdenkampe, A., Ballester, V. et Hess, L. (2002), Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂, *Nature* **416**(6881), 617-620.
- Ridder, R. (2007), *Global Forest Resources Assessment 2010: Options and recommendations for a global remote sensing survey of forests*, FAO Forest Resources Assessment Programme, Rome, Italie, 141 p.
- Robin, M. (1995), *Téledétection, Des satellites aux SIG*, Edition Nathan, Paris, 318 p.
- Rodriguez-Yi, J., Shimabukuro, Y. et Rudorff, B. (2000), Image segmentation for classification of vegetation using NOAA-AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing* **21**(1), 167-172.
- Ronchail, J., Cochonneau, G., Molinier, M., Guyot, J. L., Chaves, A. G. D. M., Guimaraes, V. et De Oliveira, E. (2002), Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans, *International Journal of Climatology*, **22**(13), 1663-1686.
- Rosolem, C. A. (2006), "Ecofisiologia da soja", in Suzuki, S., Yuyama, M. M. Et Camacho, S. A. (dir.) (2006) : *Boletim de Pesquisa de Soja 2006*, Carrion & Carrecedo, Rondonopolis, Brésil, pp. 41-51.
- Roucou, P. (1997), *Impact des températures de surface océanique d'échelle globale sur la dynamique de l'atmosphère et les précipitations tropicales en Amérique du Sud à l'est des Andes : diagnostic et simulations numériques*, Thèse de doctorat de géographie de l'Université de Bourgogne, 199 p.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. et Harlan, J. (1974), *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, Etats-Unis, 371 p.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. et Ohno, H. (2005), A crop phenology detection method using time-series MODIS data, *Remote Sensing of Environment* **96**(3-4), 366 - 374.
- Salovaara, K., Thessler, S., Malik, R. et Tuomisto, H. (2005), Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM+ satellite imagery, *Remote sensing of environment* **97**(1), 39-51.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. et Cardoso, M. (2007), Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion, *Geophysical Research Letters* **34**(L17709), 7 p.
- Santos, J. (2005), Ritmo climático e sustentabilidade socio-ambiental da agricultura comercial da soja no sudeste de Mato Grosso, *Revista do Departamento de Geografia* **17**, 61-82.
- Santos, T., Tenedorio, J., Encarnação, S., Rocha, J. (2006), Comparing pixel vs. object based classifiers for land cover mapping with Envisat-MERIS data, *26th EARSeL Symposium*, Varsovie, Pologne, 251-260.
- Savitzky, A. et Golay, M. (1964), Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical chemistry* **36**(8), 1627-1639.

- Sawyer, D. (1984), "Frontier expansion and retraction in Brazil", in Schmink, M. et Wood, C. (dir.), 1984 : *Frontier expansion in Amazonia*, University of Florida, Center for Latin American Studies, Gainesville, Etats-Unis, pp. 180-203.
- Schimel, D., House, J., Hibbard, K., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B., Apps, M., Baker, D., Bondeau, A. et others (2001), Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems, *Nature* **414**(6860), 169-172.
- Schwartz, M. et Reed, B. (1999), Surface phenology and satellite sensor-derived onset of greenness: an initial comparison, *International Journal of Remote Sensing* **20**(17), 3451-3457.
- Schwartzman, S., Moreira, A. et Nepstad, D. (2000), Rethinking tropical forest conservation: perils in parks, *Conservation Biology* **14**(5), 1351-1357.
- Schwartzman, S. et Zimmerman, B. (2005), Conservation Alliances with Indigenous Peoples of the Amazon, *Conservation Biology* **19**(3), 721-727.
- Scopel, E., Douzet, J., da Silva, F., Cardoso, A., Moreira, J., Findeling, A. et Bernoux, M. (2005), Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les cerrados brésiliens, *Cahiers Agricultures* **14**(1), 71-75.
- Sechrest, W., Brooks, T., da Fonseca, G., Konstant, W., Mittermeier, R., Purvis, A., Rylands, A. et Gittleman, J. (2002), Hotspots and the conservation of evolutionary history, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**(4), 2067.
- See, L. et Fritz, S. (2006), A method to compare and improve land cover datasets: application to the GLC-2000 and MODIS land cover products, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **44**(7), 1740-1746.
- Seluchi, M. et Marengo, J. A. (2000), Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climate aspects and examples of intense events, *International Journal of Climatology*, **20**(10), 1167-1190.
- Seo, S. et Mendelsohn, R. (2008), An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms, *Ecological Economics* **67**(1), 109-116.
- Sette, D. M. (2000), *O holorritmo e as interações tropico-extratropico na genese do clima e as paisagens do Mato Grosso*, Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de São Paulo, 375 p.
- Sheil, D. et Murdiyarso, D. (2009), How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis, *BioScience* **59**(4), 341-347.
- Shimabukuro, Y., Batista, G., Mello, E., Moreira, J. et Duarte, V. (1998), Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region, *International Journal of Remote Sensing* **19**(3), 535-541.
- Shimabukuro, Y. E., Duarte, V., Moreira, M. A., Arai, E., Rudorff, B. F. T., Anderson, L. O., Espirito Santo, F. D. B., Freitas, R. M., Aulicino, L. C. M., Maurano, L. E. P. et Aragão, J. R. L. (2005), Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do projeto DETER, *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, São Jose dos Campos, 63 p.
- Shimabukuro, Y. et Smith, J. (1991), The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **29**(1), 16-20.
- Shimizu, S., Oki, R. et Igarashi, T. (2001), Ground validation of radar reflectivity and rain rate retrieved by the TRMM precipitation radar, *Advances in Space Research*, **28**(1), 143-148.
- Simpson, J., Kummerow, C., Tao, W. et Adler, R. (1996), On the tropical rainfall measuring mission (TRMM), *Meteorology and Atmospheric physics* **60**(1), 19-36.
- Siqueira, E. (2002), *História de Mato Grosso: da ancestralidade aos dias atuais*, ed. Entrelinhas, Cuiaba, Brésil, 272 p.

- Skole, D. et Tucker, C. (1993), Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988, *Science* **260**(5116), 1905-1909.
- Smaling, E. M. A., Roscoe, R., Lesschen, J. P., Bouwman, A. F. et Comunello, E. (2008), From forest to waste: assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as a marker, *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**(3), 185-197.
- Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Vera Diaz, M., Rivero, S., Solorzano, L. et Voll, E. (2004), Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor, *Global Change Biology* **10**(5), 745-764.
- Soares-Filho, B., Coutinho Cerqueira, G. et Lopes Pennachin, C. (2002), DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier, *Ecological Modelling* **154**(3), 217-235.
- Soares-Filho, B., Nepstad, D., Curran, L., Cerqueira, G., Garcia, R., Ramos, C., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P. et Schlesinger, P. (2006), Modelling conservation in the Amazon basin, *Nature* **440**(7083), 520-523.
- Sohn, Y. et Rebello, N. (2002), Supervised and unsupervised spectral angle classifiers, *Photogrammetric engineering and remote sensing* **68**(12), 1271-1280.
- Soudani, K., le Maire, G., Dufrène, E., François, C., Delpierre, N., Ulrich, E. et Cecchini, S. (2008), Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, *Remote Sensing of Environment* **112**(5), 2643-2655.
- South, S., Qi, J. et Lusch, D. (2004), Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices, *Remote Sensing of Environment* **91**(1), 90-97.
- Souza Jr, C., Verissimo, A., Costa, A. (2008), *Transparência Florestal, Amazônia Legal*, Maio 2008, IMAZON, 12 p.
- Story, M. et Congalton, R. (1986), Accuracy assessment : A users perspective ((map interpretation)), *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **52**, 397-399.
- Su, F., Hong, Y., Littenmaier, D. P. (2008), *Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin*. Journal of Hydrometeorology, **9** (4), 622-640.
- Summers, P. (2008), *The Post-frontier: Land use and social change in the Brazilian Amazon (1992-2002)*, Thèse de Doctorat en “Philosophy in Environmental Design and planning” au Virginia Polytechnic Institute and State University, 249 p.
- Swain, P. et Davis, S. (1978), *Remote sensing: the quantitative approach*, McGraw-Hill College, New York, 396 p.
- Swain, P. et King, R. (1973), Two effective feature selection criteria for multispectral remote sensing, *International Joint Conference On Pattern Recognition*, Washington D.C., Etats-Unis, LARS Technical Note 042673, 6 p.
- Swaminathan, M. (1999), Genetic engineering and food security: Ecological and livelihood issues, *Agricultural Biotechnology and the Poor: Proceedings of an International Conference*, Washington DC, Etats-Unis, 37-42.
- Disponible à : <http://www.doylefoundation.org/icsu/CG%20Swaminathan.pdf>
- Swets, D., Reed, B., Rowland, J. et Marko, S. (1999), A weighted least-squares approach to temporal NDVI smoothing, *Proceedings of the 1999 ASPRS Annual Conference: From Image to Information*, Portland, Etats-Unis, 12 p.
- Swinton, S. M.; Lupi, F.; Robertson, G. P. et Hamilton, S. K. (2007), Ecosystem services and agriculture : cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits, *Ecological Economics* **64**(2), 245-252.

- Tauer, L. W. et Seleka, T. B. (1994), Agricultural diversity and cash receipt variability for individual states, *Cornell Agricultural Economics Paper*, **94**(1), 25 p.
- Théry, H. (2006), « Franges pionnières d'hier et d'aujourd'hui », in Zagefka P. (dir.), 2006 : *Amérique Latine 2006*, La Documentation Française, pp. 113-129.
- Théry, H. (2005), *Le Brésil*, 5^{ème} édition revue et complétée, collection U géographie, Armand Collin, Paris, 288 p.
- Théry, H. (2004), La vague déferlante du soja brésilien, *Mappemonde* **74**(7), 7 p.
- Théry, H. (1996), « Postface : L'Amazonie, le dernier "Boom" brésilien? », in Albaladejo, C. et Tulet, J.-C. (dir), 1996 : *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. La formation de nouveaux territoires*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques Latines, Paris, pp. 345-358.
- Théry, H. (1997), Routes et déboisement en Amazonie brésilienne: Rondônia 1974-1996, *Mappemonde* **3**, 35-40.
- Théry, H. et de Mello, N. (2005), Diversités et mobilités de l'agriculture brésilienne, *Cahiers Agricultures* **14**(1), 11-18.
- Thomas, I., Ching, N., Benning, V. et D'Aguanno, J. (1987), A review of multi-channel indices of class separability, *International Journal of Remote Sensing* **8**(3), 331-350.
- Tian, H., Melillo, J., Kicklighter, D., McGuire, A., Helfrich III, J., Moore III, B. et Vörösmarty, C. (1998), Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems, *Nature* **396**, 664-667.
- Tilman, D. (1999), Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **96**(11), 5995-6000.
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R. et Polasky, S. (2002), Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature* **418**(6898), 671-677.
- Townshend, J., Huang, C., Kalluri, S., Defries, R., Liang, S. et Yang, K. (2000), Beware of per-pixel characterization of land cover, *International Journal of Remote Sensing* **21**(4), 839-843.
- Townshend, J. et Justice, C. (1986), Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index, *International Journal of Remote Sensing* **7**(11), 1435-1445.
- Townshend, J. et Justice, C. (1988), Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations, *International Journal of Remote Sensing* **9**(2), 187-236.
- Tucker, C. J. (1979), Red and near-infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment* **8**, 127-150.
- Tucker, C. et Townshend, J. (2000), Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data, *International Journal of Remote Sensing* **21**(6), 1461-1471.
- Turner, F. (1963), *La frontière dans l'histoire des Etats-Unis*, Trad. A. Rambert, éd. Originale 1958, PUF, Paris, 328 p.
Disponible en version originale à : <http://xroads.virginia.edu/~Hyper/TURNER/>
- Uzogara, S. (2000), The impact of genetic modification of human foods in the 21st century : A review, *Biotechnology advances* **18**(3), 179-206.
- Valbuena, R. (2009), Les dynamiques territoriales associées au soja et les changements fonctionnels en Amazonie. Le cas de la région de Santarém, Pará, Brésil, *Confins*, **5**, 20 p.
Disponible à : <http://confins.revues.org/index5615.html>
- Van Niel, T., McVicar, T. et Datt, B. (2005), On the relationship between training sample size and data dimensionality: Monte Carlo analysis of broadband multi-temporal classification, *Remote sensing of environment* **98**(4), 468-480.
- Vera-Diaz, M., Kaufmann, R., Nepstad, D. et Schlesinger, P. (2008), An interdisciplinary model of

- soybean yield in the Amazon Basin: the climatic, edaphic, and economic determinants, *Ecological Economics* **65**(2), 420-431.
- Viovy, N., Arino, O. et Belward, A. (1992), The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series, *International Journal of Remote Sensing* **13**(8), 1585-1590.
- Vulquin, A. (1988), La circulation atmosphérique générale dans la zone intertropicale: lexemple de la façade atlantique de l'Amérique du Sud, *Annales de Géographie* **97**(544), 681-694.
- Vulquin, A. (1979), *Le climat de Buenos Aires et les climats de la façade orientale du Brésil*, Thèse de Doctorat de l'Université de Dijon, 553 p
- Walker, R. et Homma, A. (1996), Land use and land cover dynamics in the Brazilian Amazon: an overview, *Ecological Economics* **18**(1), 67-80.
- Wardlow, B. et Egbert, S. (2008), Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the US Central Great Plains, *Remote Sensing of Environment* **112**(3), 1096-1116.
- Wardlow, B. et Egbert, S. (2005), State-level crop mapping in the US Central Great Plains agroecosystem using MODIS 250-meter NDVI data, *Proceedings of Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing"*, Sioux Falls, Etats-Unis, 23-27.
- Wardlow, B., Egbert, S. et Kastens, J. (2007), Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the US Central Great Plains, *Remote Sensing of Environment* **108**(3), 290-310.
- Wardlow, B., Kastens, J. et Egbert, S. (2006), Using USDA crop progress data for the evaluation of greenup onset date calculated from MODIS 250-meter data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **72**(11), 1225-1234.
- Weinhold, D. et Reis, E. (2008), Transportation costs and the spatial distribution of land use in the Brazilian Amazon, *Global Environmental Change* **18**(1), 54-68.
- Wessels, K., De Fries, R., Dempewolf, J., Anderson, L., Hansen, A., Powell, S. et Moran, E. (2004), Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil, *Remote sensing of Environment* **92**(1), 67-83.
- White, M., Thornton, P. et Running, S. (1997), A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability, *Global Biogeochemical Cycles* **11**(2), 217-234.
- Wolker, K. (1987), The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**(4), 540-558.
- Xin, J., Yu, Z., van Leeuwen, L. et Driessen, P. (2002), Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* **4**(2), 109-117.
- Zeilhofer, P. et Fonseca, G. (2007), "Padrões espaciais da qualidade da água na bacia do alto e médio Teles Pires", in Maitelli, G. T. Et Zamparoni, C. A. (dir.), 2007 : *Expansão da soja na pré-Amazônia mato-grossense. Impactos ambientais*. Ed. Entrelinhas, Cuiabá, Brésil, pp. 89-106.
- Zeng, N. (1999), Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle, *Journal of Geophysical Research*. **104**(D8), 9097-9106.
- Zhang, W., Ricketts, T., Kremen, C., Carney, K. et Swinton, S. (2007), Ecosystem services and dis-services to agriculture, *Ecological Economics* **64**(2), 253-260.
- Zhang, X., Friedl, M., Schaaf, C., Strahler, A., Hodges, J., Gao, F., Reed, B. et Huete, A. (2003), Monitoring vegetation phenology using MODIS, *Remote Sensing of Environment* **84**(3), 471-475.

Zhou, J. et Lau, K.M. (1998), Does a monsoon climate exist over South America?, *Journal of Climate*, **11**, 1020-1040.

Sources utilisées

Images Satellites :

TRMM (Tropical Rainfall Mapping Mission) :

http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM_DP/01_Data_Products/02_Gridded/06_3-hour_Gpi_Cal_3B_42/

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) :

https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool

CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) et LANDSAT:

<http://www.inpe.br/>

Données climatiques :

Données pluviométriques de l'ANA (sistema de informações hidrologicas da Agencia Nacional de Aguas, Brésil) : <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

Données de Multivariate ENSO index:

<http://www.cdc.noaa.gov/peaopel/klaus.wolker/MEI/>

Données de températures de surface océanique :

<http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List/>

Données statistiques et autres sites :

Données de l'IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística):

<http://www.sidra.ibge.gov.br/>

Données de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United States):

<http://faostat.fao.org/>

Données de déforestation de l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brésil). Projeto PRODES : http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2007.htm

Données de l'UDOP (União dos Produtores de Bioenergia, Relação das Unidades de Açúcar, Álcool e Biodiesel do Mato Grosso) : <http://www.udop.com.br/>

Données de l'USDA (United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service) : <http://www.nass.usda.gov/>

Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil :

<http://www.pnud.org.br/home/>

Projet DURAMAZ :

<http://www.iheal.univ-paris3.fr/spip.php?rubrique361>

Liste des figures

Introduction générale

Figure 0.1 : Localisation du Mato Grosso en Amérique du Sud, au Brésil et en Amazonie.	12
Figure 0.2 : Présentation des interactions nature / société.....	13
Figure 0.3 : Présentation de l'organigramme de la thèse	17

Partie 1

Figure 1.1 : Carte de végétation du Brésil avec les limites de l'Amazonie Légale	23
Figure 1.2 : Phases d'occupation de l'Amazonie menée par les gouvernements fédéraux entre 1950 et 1989 ...	27
Figure 1.3 : Ecart à la moyenne (pointillés) des flux de carbone entre l'atmosphère et la biosphère entre 1980 et 1999.....	31
Figure 1.4 : Présentation du cycle du carbone.....	34
Figure 1.5 : Présentation du cycle de l'eau selon l'échelle d'étude.....	36
Figure 1.6 : Bilan du cycle de l'eau en Amazonie	38
Figure 1.7 : Aires protégées en Amazonie Légale	44
Figure 1.8 : Photographies aériennes des villes de Juina et Sinop lors de leur construction.....	52
Figure 1.9 : Cycle de vie d'une exploitation agricole.	54
Figure 1.10 : Présentation de différents types de paysages correspondant à différents types de colonisation agricole (images Landsat).	57
Figure 1.11 : Modèle de cycle de vie du front pionnier (Coy, 1996).	58
Figure 1.12 : Evolution spatio-temporelle du front pionnier.....	62
Figure 1.13 : Evolution de la production agricole mondiale entre 1980 et 2004	65
Figure 1.14 : Evolution de la population et de la malnutrition dans le monde	66
Figure 1.15 : Les facteurs de la révolution verte : une hausse modérée des surfaces agricoles (1) compensée par une forte mécanisation (2), l'application d'engrais (3 et 4) et de pesticides (5 et 6).....	69
Figure 1.16 : Interrelations entre écosystèmes, agrosystèmes et sociétés dans le cadre de l'intensification agricole.	72
Figure 1.17 : Localisation du Mato Grosso et de la commune de Sorriso	80
Figure 1.18 : Evolution des surfaces cultivées des principales cultures au Mato Grosso.	81
Figure 1.19 : Part de chaque pays dans la production et l'exportation du soja du soja en 2008	83
Figure 1.20 : Productions agricoles par commune au Mato Grosso en 2005.	84
Figure 1.21 : Paysages agricoles à Campo Novo do Parecis	85
Figure 1.22 : Evolution comparée des superficies cultivées en soja au Mato Grosso et des prix du sac de soja (60 kg) au Mato Grosso entre 1994 et 2007	87
Figure 1.23 : Vagues migratoires successives des familles des sojiculteurs matogrossenses	89
Figure 1.24 : Evolution comparée du cours du soja au Brésil (en US\$ et en R\$) et du taux de change Dollar/Real entre 1994 et 2006	91
Figure 1.25 : Evolution des cours du soja et des coûts de production de soja au Mato Grosso entre 1998 et 2006	91
Figure 1.26 : Evolution de la déforestation dans la commune de Sorriso	96
Figure 1.27 : Relations entre les superficies déboisées et les profits du soja à l'année t et les superficies mises en culture à l'année t+1	97
Figure 1.28 : Culture de maïs à Sorriso.....	99
Figure 1.29 : Evolution des cours du soja et du maïs en reals par hectare au Mato Grosso.....	100
Figure 1.30 : Différenciation du SGM et du soja conventionnel à Sorriso	104
Figure 1.31 : Photos d'Aire de Protection Permanente préservée et dégradée à Sorriso.....	107
Figure 1.32 : Sensibilisation des enfants des écoles de Sorriso aux problèmes de conservation de la qualité des sols et de l'eau.....	108

Partie 2

Figure 2.1 : Evolution des surfaces agricoles semées en simple ou double culture à Comodoro (est du Mato Grosso), dans une région de 40 100 km ²	125
Figure 2.2 : Cartes de déforestation et de dynamique agricole dans le monde entre 1981 et 2000	128
Figure 2.3 : Relation entre expansion agricole et déforestation au Mato Grosso entre 2001 et 2004.	129
Figure 2.4 : Estimation de la rentabilité du soja en Amazonie.....	133

Liste des figures

Figure 2.5. Profils spectraux de différents types d'occupation du sol.....	134
Figure 2.6 : Organigramme de la création des images MOD13Q1	139
Figure 2.7 : Modèle de série temporelle de EVI d'un pixel extrait d'une parcelle agricole semée en double culture.....	144
Figure 2.8 : Présentation du principe des tests de séparabilité entre 4 classes A, B, C et D.	150
Figure 2.9 : Illustration du principe du classificateur Spectral Angle Mapper.....	154
Figure 2.10 : Présentation de l'approche orientée-objets par la méthode classique et la nouvelle méthode proposée.	158
Figure 2.11 : Communes visitées lors des différentes missions de terrain réalisées.	164
Figure 2.12 : Exemples de fazendas visitées à Lucas do Rio Verde, Sapezal et Sorriso et cartographiées à partir d'images CBERS-CCD et de données fournies par les producteurs.	164
Figure 2.13 : Localisation des fazendas visitées au Mato Grosso lors des diverses missions de terrain.....	166
Figure 2.14 : Exemple d'image MODIS/TERRA EVI du Mato Grosso le 28 juillet 2005.....	170
Figure 2.15 : Nombre de mesures jugées de qualité non satisfaisante par l'outil LDOPE entre juillet 2005 et juillet 2006.	171
Figure 2.16 : Séries temporelles des quatre types d'occupation du sol étudié.	173
Figure 2.17 : Histogrammes des quatre types d'occupation du sol selon les attributs sélectionnés.....	174
Figure 2.18 : Résultats de la création du masque agricole en 2006-2007 pour cinq fazendas choisies dans quatre communes mato-grossenses.	176
Figure 2.19 : Résultats de la création du masque agricole en 2006-2007 au Mato Grosso.....	176
Figure 2.20 : Séries temporelles de EVI des 6 classes agricoles étudiées.....	177
Figure 2.21 : Exemple d'un profil temporel de EVI d'une culture de riz repérée en 2005-2006.....	178
Figure 2.22 : Comparaison du profil moyen de EVI des classes « Intégration Culture-Elevage » et « Soja+maïs »	179
Figure 2.23 : Détection de pivots d'irrigation à Sorriso en août 2006 à partir de données CBERS.....	179
Figure 2.24 : Comparaison d'un profil temporel de EVI d'un pixel avec un pivot en saison sèche et du profil moyen de la classe « soja+coton » (sans pivot).....	180
Figure 2.25 : Exemple de profil temporel MODIS/EVI d'un pixel cultivé en canne à sucre à Campo Novo do Parecis	181
Figure 2.26 : Exemples de lissages de séries temporelles de EVI avec différents paramètres appliqués aux algorithmes WLS, BISE, MVI, Filtre SG.....	183
Figure 2.27 : Comparaison des différentes méthodes de lissage de série temporelle de EVI	184
Figure 2.28 : Distance de Jeffries-Matusita mesurée entre chaque classe et les cinq autres classes pour chaque image MODIS	187
Figure 2.29 : Evolution de l'indicateur de séparabilité moyen Jave au cours de l'année selon les différentes données de EVI.	188
Figure 2.30 : Comparaison des classificateurs Maximum de Vraisemblance et Spectral Angle Mapper selon le nombre d'images MODIS TERRA/EVI (lissées par le filtre de Savitzky-Golay) intégrées en entrée de la classification.	190
Figure 2.31 : Comparaison des profils temporels moyens de la classes « Soja+Coton » pour les années 2005-2006 et 2006-2007.....	191
Figure 2.32 : Comparaison de l'indice Kappa obtenu à partir des deux méthodes d'attribution de classes pour différentes valeurs appliquées au facteur « Scale Parameter ».....	194
Figure 2.33 : Résultats des classifications avec six classes par pixel et après segmentation pour cinq fazendas au Mato Grosso	195
Figure 2.34 : Résultats des classifications après segmentation avec six et cinq classes pour cinq fazendas au Mato Grosso (O.A. = Overall Accuracy = Précision Globale).	197
Figure 2.35 : Résultat de la classification en cinq classes au Mato Grosso et à Sorriso pour la récolte 2006-2007.	198
Figure 2.36 : Comparaison de l'évolution des superficies semées en soja (A), maïs (2 ^{ème} récolte) (B) et coton (1 ^{ère} + 2 ^{ème} récolte) (C) au Mato Grosso.	204
Figure 2.37 : Exemple de profil temporel de EVI d'un pixel mal classifié comme coton à Barra do Garças et comparaison avec les profils moyens des classes coton et soja.....	205
Figure 2.38 : Présentation de la méthode de classification appliquée pour cartographier les cultures à partir des données MODIS/TERRA EVI.....	206

Partie 3

Figure 3.1 : Carte de végétation potentielle du Mato Grosso.	215
---	-----

Figure 3.2 : Comparaison des cartes de végétation forêt-cerrado obtenues à partir des données PRODES et PRODEAGRO, au Mato Grosso et à Sorriso.....	216
Figure 3.3 : Comparaison des déboisements annuels calculés par le projet PRODES et par la SEMA.....	219
Figure 3.4 : Comparaison de la déforestation détectée par le projet PRODES et par la SEMA pour le biome forêt entre 2001 et 2005.....	220
Figure 3.5 : Comparaison des données de déforestation fournies par la SEMA et issues du projet PRODES pour l'année 2004 sur cinq communes <i>matogrossenses</i>	222
Figure 3.6 : Comparaison des données de déforestation fournies par la SEMA et issues du projet PRODES pour la commune de Vera sur la période 2001-2005.....	223
Figure 3.7 : Présentation de la méthodologie appliquée à une cellule de 0,25° pour la récolte 2006-2007 afin de détecter les fronts démographiques, économiques et d'intensification.....	227
Figure 3.8 : Schéma de présentation de la méthodologie appliquée pour quantifier le lien entre le front économique et le front d'intensification.....	231
Figure 3.9 : Evolution spatio-temporelle du front pionnier.....	234
Figure 3.10 : Présentation de la méthodologie de détection du front économique.....	236
Figure 3.11 : Illustration de l'application de la méthode d'interpolation des Splines aux cartes originales à la résolution de 0,25°.....	238
Figure 3.12 : Carte de la déforestation au Mato Grosso en 1992 et 2007.....	243
Figure 3.13 : (A) Pourcentage de végétation déboisée au Mato Grosso en 1992 et 2006 ; (B) Pourcentage de territoire déboisé entre 2000 et 2006 ; (C) Période au cours de laquelle le seuil de 50% de déboisement est franchi.....	245
Figure 3.14 : Evolution des superficies cultivées au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.....	246
Figure 3.15 : Evolution des superficies cultivées en biome forêt ou cerrado entre 2000-2001 et 2006-2007.....	247
Figure 3.16 : Evolution des surfaces agricoles au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.....	248
Figure 3.17 : Dynamique spatio-temporelle du front économique.....	251
Figure 3.18 : (A) Cartes des surfaces cultivées par rapport aux surfaces déboisées en 2005-2006 et 2006-2007 et (B) Evolution des surfaces cultivées entre 2005-2006 et 2006-2007 (en valeurs absolues).....	252
Figure 3.19 : Evolution de la diversification au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007 : (A) Part des cultures de soja, maïs, et coton dans le total des cultures semées ; (B) Evolution de l'indice de diversification au Mato Grosso.....	254
Figure 3.20 : Evolution de l'adoption de nouvelles pratiques culturales au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.....	255
Figure 3.21 : Evolution des modes de production du coton au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.....	255
Figure 3.22 : Cartes des cultures de soja, maïs et coton au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.....	257
Figure 3.23 : Cartes des pratiques culturales adoptées au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.....	258
Figure 3.24 : Cartes des surfaces cultivées en coton en 2000-2001 et 2006-2007 en fonction des pratiques culturales adoptées pour les trois principales régions agricoles matogrossenses.....	259
Figure 3.25 : Evolution de l'intensification agricole entre 2000-2001 et 2006-2007.....	262
Figure 3.26 : Schéma de présentation de l'occupation du sol au Mato Grosso en 2007.....	264
Figure 3.27 : Pourcentage des surfaces nouvellement mises en cultures (annuellement et sur la période d'étude) sur des parcelles anciennement défrichées ou récemment défrichées.....	267
Figure 3.28 : Présentation du lien entre expansion agricole et déforestation.....	269
Figure 3.29. Evolution de la déforestation à des fins non agricoles entre 2000 et 2006 en fonction du niveau d'expansion agricole entre 2000-2001 et 2006-2007 dans une unité spatiale (0,25°x 0,25°) et de la distance par rapport à cette unité spatiale.....	271
Figure 3.30 : Mise en relation des régions agricoles intensifiées et des zones d'expansion agricole intense entre 2000 et 2006.....	272
Figure 3.31 : Evolution de l'expansion agricole entre 2000-2001 et 2006-2007 en fonction du niveau d'intensification agricole dans une unité spatiale (0,25°x 0,25°) et de la distance par rapport à cette unité spatiale.....	273
Figure 3.32 : Part de l'augmentation des surfaces semées entre 2000-2001 et 2006-2007 expliquée par l'adoption des systèmes de production en double cultures commerciales.....	274
Figure 3.33 : Mise en relation des régions agricoles intensifiées et des zones de déforestation intenses entre 2000 et 2006.....	275
Figure 3.34 : Evolution de la déforestation en fonction du niveau d'intensification agricole.....	276
Figure 3.35 : Cartographie des stades de colonisation au Mato Grosso en 2000-2001 et 2006-2007.....	278
Figure 3.36 : Evolution temporelle des stades d'occupation du sol entre 2000 et 2006 pour sept localités agraires du Mato Grosso.....	279
Figure 3.37 : Profils spatiaux de l'occupation du sol en 2006-2007 pour les quatre régions du soja repérées.....	282

Partie 4

Figure 4.1 : Carte du relief du Mato Grosso et des 116 stations répertoriées au Mato Grosso. 290

Figure 4.2 : Précipitations mensuelles moyennes pour 3 stations du Mato Grosso localisées sur la carte de la figure 4.1. 291

Figure 4.3 : Schéma de la circulation atmosphérique en Amérique du Sud en janvier et juillet .. 292

Figure 4.4 : Schémas des circulations zonales en période normale et en période ENSO 293

Figure 4.5 : Corrélations entre les MEI (Indice Multivarié de ENSO) et les précipitations et les températures de l'air 294

Figure 4.6 : Présentation des méthodes proposées par Marengo *et al.* (2001) et Odekunle (2006) pour détecter les dates de début et de fin des pluies. 301

Figure 4.7 : Calcul des dates de début et fin des pluies pour l'année 2004-2005 pour la station de Sorriso avec deux seuils de précipitations journalières (2,2 mm/jour et 5,1 mm/jour). 302

Figure 4.8 : Coefficients de corrélation obtenus pour les 116 stations prises en compte en 2004-2005 et interpolés sur le Mato Grosso. 304

Figure 4.9 : Précipitations annuelles moyennes (1998-2007) calculées à partir des données TRMM 3B42 (en mm). 306

Figure 4.10 : Précipitations moyennes mensuelles (1998-2007) estimées par TRMM 3B42. 306

Figure 4.11 : Résultats d'une ACP sans rotation sur les totaux pluviométriques mensuels bruts TRMM (janvier 1998 à juillet 2006) 308

Figure 4.12 : Cartes des paramètres de la saison des pluies calculés à partir de la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann *et al.*, 2007)..... 310

Figure 4.13 : Gradient nord/sud des paramètres de la saison des pluies calculés par la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann *et al.*, 2007) avec un seuil = 5,1mm. 311

Figure 4.14 : Début des pluies calculé pour 1999-2000 (A) et 2002-2003 (B). 312

Figure 4.15 : Méthodes employées pour détecter les dates de semis et de récolte du soja au Mato Grosso à partir des séries temporelles MODIS TERRA/EVI : méthode MATS et méthode par seuil 316

Figure 4.16 : Comparaison des estimations de dates de semis et de récoltes à partir des séries temporelles de MODIS TERRA/EVI avec les données récoltées sur le terrain, dans des fazendas situées sur la Chapada dos Parecis (Sapezal) pour la récolte 2005-2006..... 318

Figure 4.17 : Présentation des relations entre précipitations et pratiques agricoles au Mato Grosso. 319

Figure 4.18 : Etude de la dépendance entre le niveau d'intensification agricole par localité agraire (pixel TRMM de 0,25° x 0,25°) et les paramètres de la saison des pluies..... 329

Figure 4.19 : Evolution des dates de semis du soja en fonction de la classe d'utilisation du sol au Mato Grosso pour la récolte 2006-2007. 333

Figure 4.20 : (A) Evolution du niveau d'intensification agricole en fonction de la date de semis ; (B) Test du Chi-2 d'indépendance entre les dates de semis et le niveau d'intensification agricole. 334

Figure 4.21 : (A) Evolution des rendements en fonction de la date de semis ; (B) Probabilité d'obtenir des rendements faibles, moyens ou élevés en fonction de la date de semis ; (C) Test du Chi-2 d'indépendance entre les rendements et les dates de semis. 336

Figure 4.22 : Evolution de la superficie semée par période de semis au Mato Grosso. Les chiffres sont calculés à partir de 928 parcelles (161 158 ha) renseignées au moins une fois entre 2003-2004 et 2006-2007. 337

Figure 4.23 : (A) Evolution des valeurs maximales de EVI en fonction de la date de semis ; (B) Probabilité d'obtenir des valeurs maximales de EVI faibles, moyennes ou élevées en fonction de la date de semis ; (C) Test du Chi-2 d'indépendance entre les valeurs maximales de EVI et les dates de semis. Les dates de semis ont été obtenues lors de missions de terrain.. 338

Figure 4.24 : Séries temporelles de EVI en fonction des rendements observés dans les parcelles dont les informations ont été renseignées lors de missions de terrain. 339

Figure 4.25 : (A) Evolution du maximum de EVI en fonction des rendements observés sur le terrain ; (B) Test du Chi-2 d'indépendance entre les valeurs maximales de EVI et les rendements. 340

Figure 4.26 : Séries temporelles moyennes de EVI entre les récoltes 2000-2001 et 2006-2007 de cinq communes matogrossenses..... 341

Figure 4.27 : (A) Evolution des valeurs maximales de EVI en fonction des date de semis au cours de la période 2000-2001 à 2006-2007 ; (B) Evolution de la proportion de surface agricole annuelle semée de manière anticipée, optimale ou tardive entre 2000-2001 et 2006-2007. 343

Figure 4.28 : Détection des situations de semis de soja au Mat Grosso (toutes les années ne sont pas présentées pour des raisons de place). 345

Figure 4.29 : Détection des situations de semis entre 2000-2001 et 2006-2007 pour les deux principales régions agricoles du Mato Grosso : la région centre, représentée par Lucas do Rio Verde et la Chapada dos Parecis, représentée par Sapezal 346

Liste des tableaux

Partie 1

Tableau 1.1 : Nombre d'espèces totales et endémiques de plantes et de vertébrés en Amazonie et dans le cerrado.	29
Tableau 1.2 : Comparaison des estimations des paramètres <i>P</i> , <i>E</i> , <i>R</i> , <i>C</i> et <i>Imbalance</i> par Marengo (2005) et Zeng (1999).	38
Tableau 1.3 : Risques et bénéfices potentiels liés au développement des biotechnologies en agriculture	75
Tableau 1.4 : Comparaison des coûts de production et des prix de vente du soja au Mato Grosso et au Parana pour les récoltes 2003-2004 et 2005-2006.....	92
Tableau 1.5 : Comparaison des coûts de production pour un semis de soja conventionnel et un semis de Soja Génétiquement Modifié (SGM) à Sorriso en 2007-2008.....	102

Partie 2

Tableau 2.1 : Principaux programmes de cartographie de l'occupation du sol et les capteurs employés	118
Tableau 2.2 : Exemple de matrice de contingence servant à la réalisation du test de Mc Nemar.	160
Tableau 2.3 : Bilan des classes repérées sur le terrain et cartographiées.	166
Tableau 2.4. Paramètres testés pour les différentes méthodes de lissage.	181
Tableau 2.5 : Résumé de l'analyse préliminaire des différents algorithmes de lissage des séries temporelles d'indices de végétation.	185
Tableau 2.6 : Distances de Jeffries-Matusita calculées pour l'année 2005-2006 sur les 23 dates des profils temporels de EVI d'après les données lissées par WLS et SG.	186
Tableau 2.7 : Classement des images/dates MODIS TERRA/EVI selon leur potentiel de séparabilité pour les six classes de l'étude.	189
Tableau 2.8 : Matrice de confusion obtenue par le classificateur en Maximum de Vraisemblance avec les données EVI lissées par le filtre SG et 13 variables en entrée.....	192
Tableau 2.9 : Matrice de confusion de la classification par Maximum de Vraisemblance avec 13 dates MODIS en entrée et avec l'application d'une segmentation pour 6 classes.	196
Tableau 2.10 : Matrice de confusion de la classification par Maximum de Vraisemblance avec 13 dates MODIS en entrée et avec l'application d'une segmentation pour 5 classes. La classe « Soja+Sorgho » est regroupée avec la classe « Soja+millet ».	196
Tableau 2.11 : Résultats des matrices de confusion obtenues pour les différents indicateurs de l'intensification agricole sélectionnés.	199
Tableau 2.12 : Comparaison des surfaces cultivées en soja, maïs (deuxième récolte) et coton au Mato Grosso pour la récolte 2005-2006.	200
Tableau 2.13 : Comparaison des superficies cultivées estimées par la classification et l'IBGE pour 5 communes tests.	201
Tableau 2.14 : Comparaison des taux de croissance annuels des superficies cultivées en soja, maïs (2 ^{ème} récolte) et coton au Mato Grosso à partir des données de l'IBGE et des données issues des classifications d'images MODIS TERRA/EVI.	203

Partie 3

Tableau 3.1 : Bilan des données de déforestation utilisées dans cette étude.	218
Tableau 3.2 : Comparaison des données de déforestation obtenues para la SEMA et par le PRODES entre 2001 et 2005.	219
Tableau 3.3 : Les variables employées pour détecter les fronts démographiques, économiques et d'intensification et leurs liens.	233
Tableau 3.4 : Bilan de la déforestation au Mato Grosso en 2007 par type de végétation et statut administratif.	240
Tableau 3.5 : Evolution de la déforestation au Mato Grosso entre 1993 et 2005.....	241
Tableau 3.6 : Evolution des surfaces cultivées en soja, maïs et coton au Mato Grosso entre 2000-2001 et 2006-2007.	253

Partie 4

Tableau 4.1 : Equations correspondant aux critères statistiques utilisés dans cette étude pour un jeu de données de références v_i (d'estimation e_i).....	298
Tableau 4.2 : Table de contingence pour la validation de la qualité des données TRMM à détecter les périodes pluvieuses.	298
Tableau 4.3 : Equations correspondant aux critères statistiques utilisés dans cette étude pour valider les données TRMM 3B42.	299
Tableau 4.4 : Critères statistiques (coefficient de corrélation, biais, RMSE et indice de Nash) calculés entre les estimations TRMM 3B42 et les données de 116 stations pour différents pas de temps et différentes résolutions spatiales.	304
Tableau 4.5 : Critères statistiques (FBI, FAR, POD et ETS) calculés entre les estimations TRMM 3B42 et les données de 116 stations au pas de temps journalier pour une résolution spatiale de $0,25^\circ$	305
Tableau 4.6 : Validation des estimations des dates de semis et de récolte à partir des séries temporelles MODIS TERRA/EVI.	317
Tableau 4.7 : Paramètres de la saison des pluies pour les quatre communes prises en exemple dans l'étude : Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana.	325
Tableau 4.8 : Coefficients de corrélation et de détermination entre le niveau d'intensification agricole dans une localité agraire (ici représentée par une cellule de $0,25 \times 0,25^\circ$) et les paramètres de la saison des pluies.....	327
Tableau 4.9 : Variabilité de la saison des pluies pour les quatre communes prises en exemple dans l'étude : Sapezal, Sorriso, Rondonopolis et Canarana.	330

Table des matières

Remerciements	5
Sommaire	7
Résumé/Abstract/Resumo	9
Introduction générale	11
Partie 1 : La culture du soja en Amazonie, un facteur d'expansion et d'intensification agricole.....	19
<hr/>	
<i>Introduction de la Partie 1</i>	<i>20</i>
<i>Chapitre 1. Entre développement et préservation : les enjeux nationaux et internationaux de la mise en valeur de l'Amazonie.....</i>	<i>21</i>
1. Introduction	21
2. L'intégration de l'Amazonie au territoire national : une réponse à des enjeux socio-économiques et géopolitiques	21
2.1. 1930-1945 : la marche vers l'Ouest	21
2.2. 1946-1964 : un nouveau statut pour l'Amazonie	22
2.3. 1964-1984 : les militaires organisent l'occupation de l'Amazonie	23
2.4. 1985-2009 : la régionalisation de l'Amazonie	25
3. L'occupation de l'Amazonie et ses enjeux environnementaux	28
3.1. La biodiversité	28
3.1.1. L'Amazonie et les cerrados : des biomes à protéger	28
3.1.2. Impact de la déforestation sur la biodiversité	29
3.2. Le cycle du carbone	30
3.2.1. L'Amazonie : puits ou source de carbone ?	30
3.2.2. Impact de la déforestation sur le cycle du carbone	32
3.3. Le cycle de l'eau	35
3.3.1. Un cycle de l'eau soumis à de fortes variabilités spatiotemporelles	35
3.3.2. Impact de la déforestation sur le cycle de l'eau	39
4. La préservation de l'Amazonie au 21^{ème} siècle	40
4.1. Une pression internationale pour la préservation de l'Amazonie	40
4.2. Des actions efficaces à échelle nationale et locale	42
4.2.1. La législation environnementale	42
4.2.2. Les espaces protégés : un frein à la déforestation	43
5. Conclusion	44
<i>Chapitre 2. Les fronts pionniers amazoniens : une spécificité matogrossense ?.....</i>	<i>47</i>
1. Introduction	47
2. Les fronts pionniers : des territoires dynamiques	47
2.1. Une dynamique contrôlée par une logique économique	47
2.2. Une organisation spatiale caractéristique	49

3. La frontière agricole : le principal moteur du front pionnier	52
3.1. Des exploitations agricoles dynamiques	53
3.1.1. Le cycle de vie d'une exploitation agricole	53
3.1.2. Des organisations spatiales diverses	56
3.2. De l'exploitation agricole à la frontière agricole	58
3.2.1. Les phases d'évolution de la frontière agricole	58
3.2.2. L'organisation spatiale de la frontière agricole au cœur du front pionnier	60
4. Conclusion	62
<i>Chapitre 3. L'intensification agricole : de la « Révolution Verte » à l'intensification écologique</i>	65
1. Introduction	65
2. La « révolution verte »	66
2.1. La transition agricole	67
2.2. Les limites de la « révolution verte »	69
2.2.1. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation	69
2.2.2. Des nouvelles pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement	71
3. L'agriculture au 21ème siècle, vers une intensification écologique	74
4. Conclusion	76
<i>Chapitre 4. Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso : l'exemple de Sorriso</i>	79
1. Introduction	80
2. Développement économique et émergence de nouveaux territoires	80
2.1. Le Mato Grosso, nouveau grenier du Brésil	80
2.2. La formation des territoires du soja au Mato Grosso	85
3. La prédominance du soja : une source de fragilité économique	90
3.1. La crise économique de 2004 à 2007	90
3.2. Les limites socio-environnementales du « modèle » matogrossense	93
4. Les tentatives d'adaptation : diversification, développement durable	98
4.1. L'adoption de nouvelles pratiques culturelles	98
4.1.1. La diversification	98
4.1.2. Les biotechnologies : intérêts et limites du Soja Génétiquement Modifié	101
4.1.3. Des nouvelles pratiques de semis et de rotations de cultures	102
4.2. Le développement de projets de développement durable	105
5. Conclusion	108
<i>Synthèse de la Partie 1</i>	110

Partie 2 : Apport de la télédétection à moyenne résolution pour le suivi de la dynamique spatiotemporelle du soja.....113

Introduction de la Partie 2 **114**

Chapitre 5. Les études d'occupation et d'utilisation du sol en Amazonie..115

1. Introduction	115
2. L'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol	116
2.1. Apport de la télédétection pour la cartographie des changements d'occupation et d'utilisation du sol	116
2.1.1. La cartographie des couverts végétaux et de la déforestation	116
2.1.1.1. La cartographie des couverts végétaux	116
2.1.1.2. Détection des changements d'occupation du sol : le suivi de la déforestation	119
2.1.2. La cartographie des surfaces agricoles et des pratiques agricoles	122
2.1.2.1. La cartographie des surfaces agricoles	122
2.1.2.2. Détection des changements d'utilisation du sol : l'intensification agricole	124
2.2. Analyse intégrée des changements d'occupation et d'utilisation du sol	125
2.1.1. L'expansion agricole, un vecteur de déforestation	126
2.1.2. Les mécanismes de la déforestation et de l'expansion agricole	129
3. Les principes de la télédétection des couverts végétaux : application aux données MODIS	133
3.1. Les principes fondamentaux de la télédétection des couverts végétaux	133
3.1.1. Le NDVI	135
3.1.2. Le EVI	135
3.2. Les données MODIS	136
3.2.1. Présentation des produits MODIS	136
3.2.2. Les caractéristiques techniques des indices de végétation des produits MODIS	137
4. Conclusion	140

Chapitre 6. Les classifications de séries temporelles d'indices de végétation.....143

1. Introduction	143
2. Présentation des séries temporelles d'indices de végétation	143
3. Présentation des algorithmes de lissage	145
4. Sélection ou extraction des attributs des séries temporelles d'indices de végétation	147
5. Choix d'un algorithme de classification	151
6. Amélioration de la classification	155
6.1. Les filtres	155
6.2. Les approches orientées-objets	156
7. Validation de la classification	159
8. Conclusion	160

Chapitre 7. Application de la méthodologie pour la cartographie des surfaces agricoles au Mato Grosso.....	163
1. Introduction	163
2. Présentation des données utilisées pour la classification	163
2.1. Les données de terrain	163
2.2. Les données IBGE	166
2.3. Les données MODIS	168
3. Détection des surfaces agricoles au Mato Grosso	171
3.1. Analyse des séries temporelles de EVI	172
3.2. Lissage des séries temporelles de EVI	173
3.3. Extraction d'attributs des séries temporelles de EVI	173
3.4. Classification des séries temporelles de EVI	174
3.5. Amélioration de la classification : application de filtres	175
3.6. Validation de la classification	175
4. Cartographie des cultures et des pratiques culturales au Mato Grosso	177
4.1. Les séries temporelles de EVI des classes culturales	177
4.2. Le lissage des séries temporelles de EVI	181
4.3. La sélection de variables	185
4.3.1. Tests de séparabilité sur les séries temporelles annuelles de EVI	185
4.3.2. Tests de séparabilité sur chaque image composant les séries temporelles de EVI	186
4.3.3. Feature selection	188
5. Classification et résultats	189
6. Amélioration de la classification : l'approche orientée-objets	193
6.1. La segmentation et l'attribution de classes aux objets	193
6.2. Le regroupement de classes	194
7. Validation de la classification	198
7.1. Validation à partir d'indicateurs de l'intensification agricole	198
7.1.1. La diversification des cultures	198
7.1.2. Les systèmes de production en double cultures commerciales	198
7.1.3. La couverture permanente des sols	199
7.1.4. Le semis direct	199
7.2. Validation avec les données IBGE	194
8. Conclusion	205
Synthèse de la Partie 2	208

Partie 3 : Le soja au cœur de la dynamique du front pionnier matogrossense.....211

Introduction de la Partie 3 212

Chapitre 8. Données et méthodes pour la cartographie du front pionnier213

1. Introduction	213
2. Présentation des données utilisées	213
2.1. Les données agricoles	213
2.2. Les cartes de végétation naturelle au Mato Grosso	213
2.3. Les données de déforestation	216
3. Présentation de la méthode utilisée pour analyser la dynamique du front pionnier au Mato Grosso	223
3.1. Une étude multiscalaire	224
3.2. Définition des variables caractérisant la dynamique du front pionnier	225
3.2.1. Les variables pour cartographier les fronts composant le front pionnier	225
3.2.2. Les variables pour cartographier les interactions entre fronts	227
3.2.2.1. Impact de l'expansion agricole sur la déforestation	227
3.2.2.2. L'expansion agricole et l'intensification agricole au Mato Grosso	229
3.2.2.3. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation	231
3.2.3. La cartographie des stades d'évolution du front pionnier au Mato Grosso	232
3.3. La représentation de l'information	235
3.3.1. Le mode de représentation des résultats	235
3.3.2. L'interpolation spatiale des résultats	236
4. Conclusion	238

Chapitre 9. Cartographie des fronts d'ouverture, économique et d'intensification.....239

1. Introduction	239
2. Le front d'ouverture	239
2.1. Analyse à échelle régionale	239
2.2. Analyse à échelle locale	242
3. Le front économique : l'expansion agricole au Mato Grosso	246
3.1. Analyse à échelle régionale	246
3.2. Analyse à échelle locale	246
4. Le front d'intensification : évolution des pratiques agricoles au Mato Grosso	253
4.1. Analyse à échelle régionale	253
4.2. Analyse à échelle locale	256
5. Conclusion	263

Chapitre 10. La dynamique du front pionnier.....265

1. Introduction	265
2. Impact de l'expansion agricole sur la déforestation	265

3. Expansion et intensification agricole : deux processus interdépendants	271
4. Impact de l'intensification agricole sur la déforestation	273
5. Cartographie du front pionnier matogrossense	276
6. Conclusion	282
 <i>Synthèse de la Partie 3</i>	 284
 Partie 4 : Climat et soja : le rôle des précipitations sur les dynamiques spatiales et les productions agricoles du soja.....	 287
<hr/>	
<i>Introduction de la Partie 4</i>	288
 <i>Chapitre 11. Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso.....</i>	 289
1. Introduction	289
2. Le climat du Mato Grosso : des connaissances fragmentaires liées à un réseau d'observation récent et peu dense	289
3. Données disponibles	295
3.1. Données de terrain	295
3.2. Intérêt des données TRMM 3B42	295
4. Méthodes	295
4.1. Validation des données TRMM 3B42	296
4.2. Pré-traitement des produits TRMM 3B42	299
4.2.1. Le choix des paramètres définissant la saison des pluies	299
4.2.2. Les méthodes de calcul des paramètres de la saison des pluies	300
4.3. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso	302
4.3.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels	302
4.3.2. Variabilité de la temporalité de la saison des pluies	302
5. Résultats : Variabilité spatiotemporelle des caractéristiques de la saison des pluies au Mato Grosso	303
5.1. Validation des produits TRMM 3B42	303
5.2. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso	305
5.2.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels	305
5.2.2. Variabilité de la temporalité de la saison des pluies	308
6. Conclusion	311
 <i>Chapitre 12. La pluviométrie et l'agriculture au Mato Grosso.....</i>	 313
1. Introduction	313
2. Les données utilisées	313
2.1. Les cartes d'utilisation du sol et des paramètres de la saison des pluies	313
2.2. Les cartes des dates de semis du soja	314
2.2.1. La méthode de détermination des dates de semis du soja	314
2.2.2. Validation des cartes des dates de semis du soja	316

3. Méthodologie pour déterminer l'influence des précipitations sur les pratiques agricoles	319
3.1. Les moyennes pluviométriques et l'intensification agricole	319
3.2. La variabilité pluviométrique et l'intensification agricole	321
3.2.1. La variabilité pluviométrique interannuelle au Mato Grosso	321
3.2.2. Indicateurs permettant de caractériser la vulnérabilité des productions de soja face aux conditions pluviométriques	322
3.2.2.1. La dépendance entre les dates de semis et le niveau d'intensification agricole	322
3.2.2.2. La dépendance entre les dates de semis et les rendements	322
3.2.2.3. La dépendance entre les valeurs de EVI et les dates de semis	323
3.2.2.4. La dépendance entre les valeurs de EVI et les rendements	323
3.2.3. La détection de situations de semis à risques	323
4. Résultats	324
4.1. Les moyennes pluviométriques, des paramètres explicatifs des pratiques agricoles	324
4.2. La variabilité pluviométrique, un facteur de vulnérabilité pour les producteurs de soja	330
4.2.1. La variabilité pluviométrique au Mato Grosso	330
4.2.2. Les indicateurs de vulnérabilité	332
4.2.2.1. Les dates de semis sont dépendantes du niveau d'intensification agricole	332
4.2.2.2. Les rendements sont dépendants des dates de semis	334
4.2.2.3. Les valeurs de EVI sont dépendantes des dates de semis	337
4.2.2.4. Les valeurs de EVI sont dépendantes des rendements	339
4.2.3. La détection de situations à risques à partir des données TRMM et MODIS	342
5. Conclusion	347
<i>Synthèse de la Partie 4</i>	348
Conclusion générale	351
<hr/>	
Référence bibliographiques	359
Liste des figures	381
Liste des tableaux	385
Table des matières	387

Résumé : Depuis 2000, le Mato Grosso est devenu le premier Etat producteur de soja du Brésil. Cette évolution est le résultat de la progression d'un front pionnier qui a apporté un développement socio-économique indéniable, mais a entraîné une déforestation intense. Cette thèse vise à définir l'état des interactions climat / société au Mato Grosso en déterminant le rôle de la dynamique du soja en tant que moteur du front pionnier et en évaluant comment les précipitations sont un facteur guidant l'évolution des territoires du soja. Ces dynamiques sont étudiées à partir de classifications de séries temporelles de données satellitaires MODIS TERRA/EVI. Les résultats indiquent que l'expansion agricole entre 2000 et 2007 explique 12% de la déforestation au Mato Grosso ; 71% des nouvelles cultures de soja au Mato Grosso ont été semées sur des parcelles anciennement défrichées. Actuellement, le secteur agricole semble rentrer dans une nouvelle phase de développement axée sur l'intensification agricole : 46% de l'augmentation de la production agricole est due à des changements de pratiques culturales. Ceci est la conséquence de l'adoption de systèmes de production en double cultures commerciales qui concernent 30% des surfaces agricoles en 2007 (contre 6% en 2000). Ces changements sont affectés par une forte variabilité spatiale qui est notamment liée aux conditions pluviométriques (cumul annuel, début, fin et durée de la saison des pluies). Celles-ci sont déterminées à partir des estimations de précipitations des produits TRMM 3B42. Les résultats démontrent que les régions les plus intensives sont celles où la saison des pluies est la plus longue et où le volume précipité est le plus important.

Mots clés : Mato Grosso, soja, MODIS, TRMM, front pionnier, Amazonie, déforestation, saison des pluies.

Abstract: Since 2000, Mato Grosso became the first soybean producer State in Brazil. This evolution is the result of the progression of a pioneer frontier, which brought about undeniable positive socio-economic development but also high deforestation rates. The objective of this PhD is to contribute to a better knowledge of the interactions climate / society in Mato Grosso. More precisely, this work aims at determining the role of soybean dynamic as a driving force of the pioneer frontier, as well as evaluating the way rainfalls acts on the evolution of soybean territories. The analysis of these dynamics is carried out using classifications of temporal series of MODIS TERRA/EVI remotely sensed data. Our results indicate that the soybean agricultural expansion between 2000 and 2007 explains 12 % of the deforestation in Mato Grosso. In addition, 71 % of newly cultivated soybean fields in Mato Grosso are sowed in formerly deforested areas. Another important observation is that the agricultural sector is now initiating a new stage of development based on agricultural intensification: 46 % of the increase of agricultural production was obtained through changes in agricultural management practices. This is the consequence of the adoption of double cropping systems, which concern 30 % of the cultivated area in 2007 (against 6 % in 2000). We also show that agricultural intensification is affected by a strong spatial variability linked to the rainy season characteristics (annual rainfall, onset, end and duration of the rainy season). Those were computed using precipitation estimates from remotely sensed TRMM 3B42 products. Our results demonstrate a narrow relationship between intense rainy seasons and agricultural intensification.

Keywords: Mato Grosso, soybean, MODIS, TRMM, pioneer frontier, Amazonia, deforestation, rainy season.

Resumo : Desde 2000, o Mato Grosso transformou-se no maior Estado produtor de soja do Brasil. Essa evolução é a consequência do avanço de uma frente pioneira que trouxe um desenvolvimento socioeconômico certo, mas também resultou em altas taxas de desmatamento. Esta tese procura definir as interações clima / sociedade no Mato Grosso estudando o papel da dinâmica da soja como ator essencial da frente pioneira, além de avaliar a maneira pela qual as condições pluviométricas representam um fator importante, afetando a evolução dos territórios da soja. Essas dinâmicas são estudadas a partir de classificações de séries temporais de dados do sensor MODIS /EVI. Os resultados indicam que a expansão agrícola entre 2000 e 2007 explica 12% do desmatamento no Mato Grosso ; 71% das novas áreas de soja no Estado foram plantadas em talhões previamente desmatados. Atualmente, o setor agrícola matogrossense parece iniciar uma nova fase do desenvolvimento baseada na intensificação agrícola : 46% do aumento da produção agrícola é devido a mudanças nas práticas culturais. Isso é consequência da adoção generalizada dos sistemas safra-safrinha que representaram 30% das áreas agrícolas em 2007 (contra 6% em 2000). Essas mudanças são afetadas por uma forte variabilidade espacial relacionada as condições pluviométricas (acúmulo anual de chuva, início, fim e duração da estação chuvosa), determinadas a partir das estimativas de precipitações dos produtos TRMM 3B42. Os resultados demonstram que as regiões caracterizadas por uma agricultura mais intensiva, são aquelas onde a estação chuvosa é a mais intensa, em volume e em duração.

Palavras-chave : Mato Grosso, soja, MODIS, TRMM, frente pioneira, Amazônia, desmatamento, estação chuvosa