

APPORT DES DONNEES TRMM 3B42 A L'ETUDE DES PRECIPITATIONS AU MATO GROSSO

Damien ARVOR¹, Vincent DUBREUIL^{1,5}, Josyane RONCHAIL²
et Margareth SIMÕES PENELLO MEIRELLES^{3,4}

¹ COSTEL UMR 6554 CNRS – LETG

Université Rennes 2

Place du Recteur H. Le Moal

35043 RENNES CEDEX, France

damien.arvor@uhb.fr, vincent.dubreuil@uhb.fr

² LOCEAN (CNRS-IRD-UPMC-MNHN) / ISPL

Université Paris 7

Case 100, 4 place Jussieu

75252 Paris Cedex 05, France

Josyane.Ronchail@locean-ipsl.upmc.fr

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação – Pos Graduação em Geomatica

⁴ Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024 – Rio de Janeiro, RJ

maggie.meirelles@gmail.com

⁵ Professeur invité au Centre de Développement Durable de l'Université de Brasília (bolsista da CAPES)

Résumé

En région tropicale, où les précipitations sont principalement d'origines convectives et où les réseaux d'observations au sol présentent de nombreuses lacunes, les données satellitaires TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) représentent une alternative efficace pour l'étude de la variabilité spatiotemporelle des précipitations. Celle-ci est abordée au moyen d'une analyse en composantes principales des données TRMM 3B42 (au pas de temps mensuel) de 1998 à 2006 qui permet de mettre en évidence la variabilité saisonnière et interannuelle des pluies du Mato Grosso (Brésil), situé au sud du bassin amazonien. Les produits TRMM 3B42 sont ensuite validés à partir d'indices statistiques pour permettre de définir une résolution temporelle optimale qui autorise l'analyse de paramètres tels que le début, la fin et la durée de la saison pluvieuse, décisifs pour les cultures réalisées dans cette région, notamment pour celle du soja. Pour calculer ces paramètres, la méthode « Anomalous Accumulation » proposée par Liebmann (2006) est choisie. Le début de la saison des pluies est repérée au mois d'octobre mais gagne plus tardivement le sud-est que le nord-ouest. La date de fin des pluies intervient au mois de mars et progresse par contre vers le nord selon un axe N-S. La durée de la saison des pluies est en conséquence de 4 à 5 mois. Il apparaît que la variabilité de la durée de la saison des pluies est surtout liée aux variations des dates de début des pluies (plus de 2 mois de différence entre 2 années extrêmes sur 8 ans), alors que la fin de la saison des pluies est bien plus régulière. Par ailleurs, le début de la saison des pluies varie de plus de 15 jours en moyenne entre les grandes régions de production de soja, ce qui permet de comprendre les variantes dans leurs calendriers agricoles et donne des premières indications sur la vulnérabilité des producteurs.

Mots clés : TRMM, précipitations, Mato Grosso, saison des pluies, soja.

Abstract

Contribution of the TRMM 3B42 data to the study of Mato Grosso precipitations

In tropical regions where convective rainfall is predominant while raingauge networks are deficient, satellite estimates as proposed by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) can represent an efficient alternative way of studying rainfall spatiotemporal variability. A Principal Component Analysis based on monthly data allows mapping the various rainy regimes encountered in the south Amazonian state of Mato Grosso (Brazil). The TRMM 3B42 products are then validated based on statistical indexes. It permits determining an optimal 5-days temporal scale, which is then used to calculate rainy season parameters such as date of onset and end and

duration. Those parameters are established based on the “Anomalous Accumulation” method proposed by Liebmann (2006). The date of onset occurs in October and occurs later in the south-east than in the north-west. The date of end is detected in March and progresses according to a N-S orientation. Consequently, the rainy season duration lasts from four to five months. It appears that the duration variability is especially linked to the onset variability (more than 2 months between 2 extreme years in 8 years) while the end of the rainy season is much more regular. Moreover, the onset date displays a 15 days amplitude between the main soybean productions regions. Thus, it explains the various agricultural calendars applied in Mato Grosso and help explaining the farmer's vulnerability.

Keywords: TRMM, rainfall, Mato Grosso, rainy season, soybean.

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 du fait des lacunes des réseaux d'observations traditionnelles dans cette région (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 dans les différentes forêts à ces latitudes. La communauté scientifique s'interroge sur les conséquences de l'activité humaine sur le climat et sur les cycles pluviométriques. La situation en Amazonie brésilienne et surtout dans l'Etat du Mato Grosso, situé au sud du bassin, est particulièrement intéressante en ce sens. En effet, c'est dans cet Etat que sont observés depuis plus de vingt ans les taux de déforestation les plus élevés en Amazonie, soit 36% du défrichement amazonien (INPE, 2008). La situation est d'autant plus complexe que les nouvelles activités agricoles sont très dépendantes des conditions climatiques. Ainsi, ces dernières années, au Mato Grosso, les récoltes de soja (principale culture d'exportation et source de devises pour cet Etat) ont pu être compromises du fait d'aléas pluviométriques. Les problèmes rencontrés sont de trois types : 1) une période sèche en phase de semis peut affecter les premières phases de croissance du soja et contraindre les agriculteurs à re-semer ; 2) des périodes sèches (*veranico*) ou trop pluvieuses au cours des phases végétatives ou reproductives peuvent entraîner des pertes de rendement ; 3) des périodes pluvieuses intenses en phase de récolte peuvent rendre les graines trop humides et donc affecter leur qualité, ou tout simplement empêcher l'accès des machines agricoles aux parcelles.

Ce travail vise donc à améliorer la connaissance de la répartition spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso. Dans un premier temps, les données TRMM 3B42 sont validées par les relevés de pluies au sol. Ces données sont ensuite utilisées pour analyser la variabilité interannuelle des précipitations. Enfin, des paramètres simples tels que les dates de début et de fin de la saison pluvieuse ainsi que la durée de celle-ci sont calculés. Ces paramètres permettent alors de mieux comprendre les pratiques agricoles à l'échelle régionale.

1. Cadre d'étude et données

1.1. Le climat du Mato Grosso : des connaissances fragmentaires liées à un réseau d'observation récent et peu dense

Le climat tropical du Mato Grosso est caractérisé par des contrastes pluviométriques importants liés aux grandes dimensions de cet état (906 806 km² entre 7 et 18 degrés de latitude sud ; figure 1). Cette diversité se traduit par un climat sub-équatorial dans sa partie nord et plutôt tropical dans les parties méridionales et occidentales. 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).

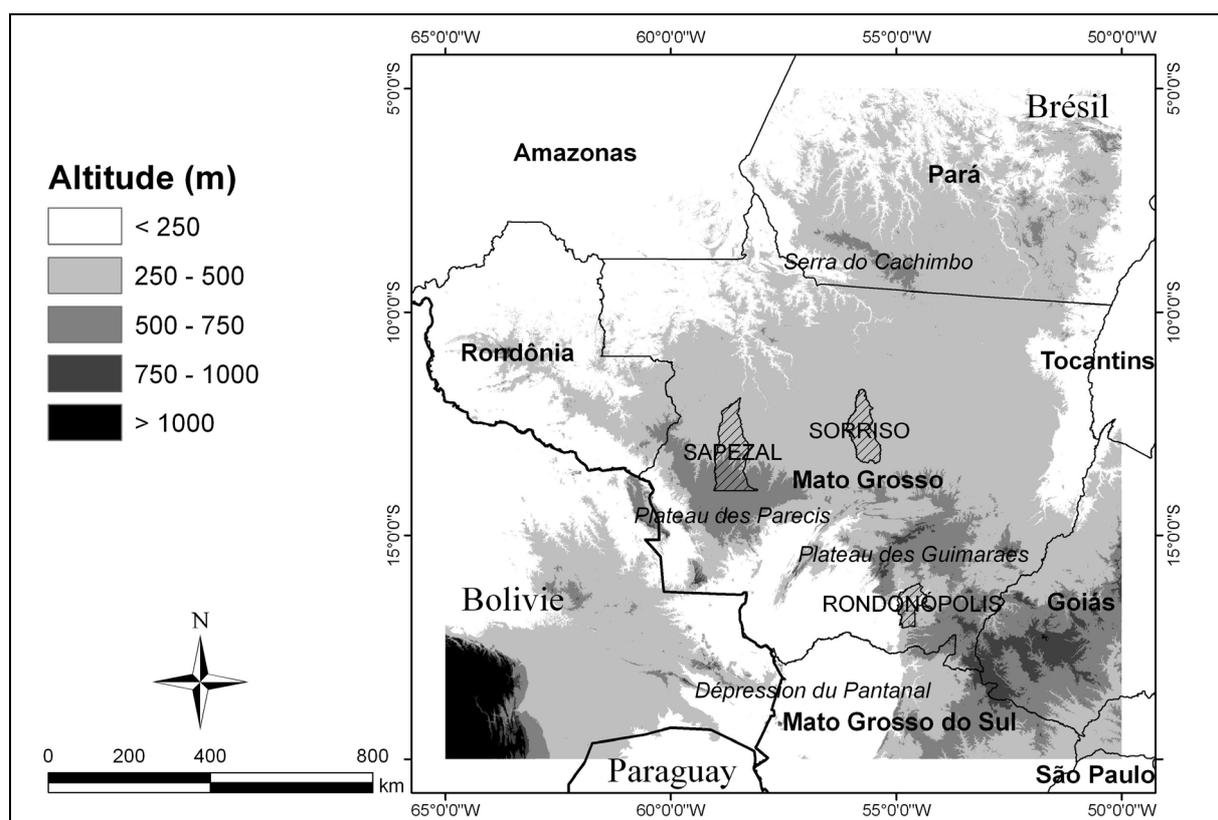


Figure 1 : Carte de localisation du Mato Grosso. Les trois communes choisies pour l'étude (Sapezal, Sorriso et Rondonópolis) sont représentatives des trois grandes régions agricoles de l'état. La carte du relief est issue des données SRTM (résolution spatiale de 90 m). *Localization map of the State of Mato Grosso. The three municipalities cited in this study (Sapezal, Sorriso et Rondonópolis) represent the three agricultural regions of Mato Grosso.*

Dans ces conditions, la pluviométrie est le facteur principal permettant de caractériser les différents climats de cette région qui, de façon générale, 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 *et al.*, 2004). La saison sèche dure entre 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). 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).

Le mois de septembre clôt généralement la saison sèche avec l'arrivée des premières pluies mais elles 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 (Roucou, 1997 ; Zhou et Lau, 1998) en relation avec la ZCAS (Zone de Convergence de l'Atlantique Sud) et la ZCIT (Zone de Convergence Inter Tropicale). La ZCAS se forme surtout pendant le printemps et l'été de l'hémisphère Sud ; orientée NW-SE et 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 pluvio-gènes 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).

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 d'août 2004 à 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 2).

Celles-ci servent alors de référence pour valider la qualité des données TRMM 3B42 pour la période considérée, comprise entre août 1998 (première année de mise en service de la mission TRMM) et juillet 2006 (soit huit années pluviométriques complètes). La fenêtre d'étude s'étend de 5° à 20° Sud et de 50° à 65°W.

1.2. Intérêt des données TRMM 3B42

La plateforme TRMM a été lancée en 1997 (Jobard, 2001), construite 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).

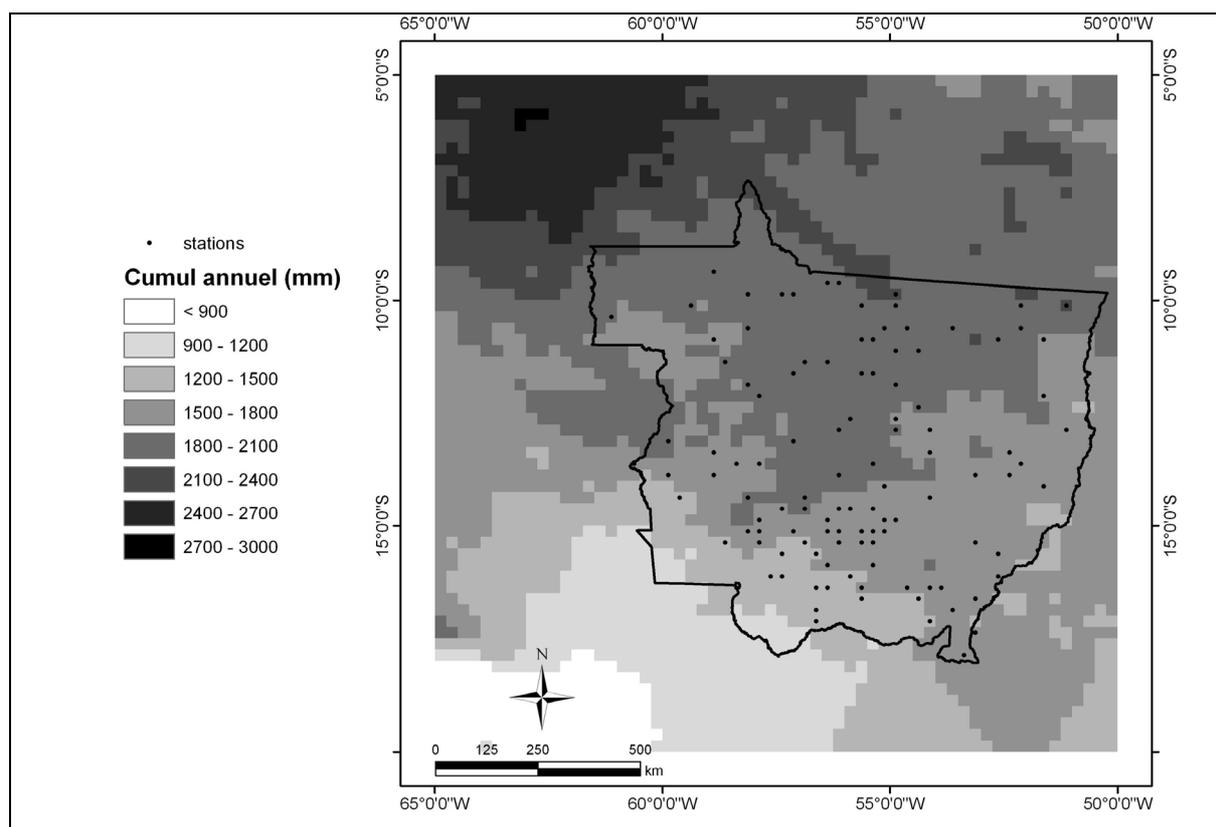


Figure 2 : Précipitations annuelles moyennes (1998-2006) calculées à partir des données TRMM 3B42 (en mm). Les 116 stations employées pour valider la qualité des données TRMM 3B42 sont également indiquées. *Mean annual precipitation (1998-2006) based on TRMM 3B42 data (mm). The 116 rain gauges used to validate the TRMM 3B42 data quality are also indicated.*

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 pluvio-gènes, 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 (Cadet et Guillot, 1991 ; Guillot, 1996). 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 ; 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), combinant des données micro ondes et infra rouges 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.*, 1995). 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 donner le produit final TRMM 3B42, version 6 (Huffman *et al.*, 2007).

2. Méthodes

2.1. Validation des données TRMM 3B42

Les données TRMM 3B42 sont utilisées pour caractériser la variabilité spatio-temporelle 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 temporelle 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. Ils mettent notamment en avant les qualités des données TRMM 3B42 pour repérer les jours non pluvieux, grâce à la haute répétitivité des données géostationnaires. Toutefois, dans cette étude, la validation doit se faire à l'échelle du Mato Grosso qui, de par sa superficie, présente une variabilité climatique plus marquée que celle du bassin du Haut Paraguay.

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, principalement d'origines convectives (Durieux, 2002), sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle 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, la superficie des systèmes convectifs de méso-échelle en Amazonie varie entre 3500 et 10 000 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 sont testés (1 jour, 5 jours, 10 jours, 30 jours). Ainsi, l'échelle temporelle la plus fine permettant l'utilisation des données TRMM 3B42 est déterminée.

Laurent *et al.* (1998) ont proposé 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 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	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(e_i - \bar{e})}{n \sigma_i \sigma_e}$
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 1 : Equations correspondant aux critères statistiques utilisés dans cette étude pour un jeu de données de références v_i (d'estimation e_i). *Equations corresponding to the statistical criterion used in this study with v_i (e_i) the reference (estimation) data.*

2.2. Prétraitement 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.

2.2.1. 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, principale activité économique régionale. Les principales cultures sont le soja (5 800 000 hectares en 2006), le maïs (1 079 000 ha) et le coton (400 000 ha). Le soja est semé entre septembre et novembre et récolté de janvier à mars. Le maïs est cultivé en deuxième culture et est semé directement après la récolte du soja. Le coton peut être cultivé en culture principale (semis en décembre et récolte en juin) ou en deuxième culture après le soja (semis en janvier et récolte en juin et juillet). Le choix des dates de semis et des cultures est directement lié aux conditions pluviométriques. Ainsi, le début de la saison pluvieuse correspond aux dates de semis du soja. 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 exploitations (*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 (plusieurs centaines voire plusieurs 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.

2.2.2. 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 (Balme *et al.*, 2005). C'est ce dernier point de vue qui sera considéré ici puisque cette étude s'intègre dans un projet de mise en relation des conditions pluviométriques et de la culture du soja au Mato Grosso.

Il existe de nombreuses méthodes différentes 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 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. Au Nigéria, Odekunle (2006) applique une méthode basée sur le pourcentage de précipitations cumulées par pentade. 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 (*néгатif*) 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. Enfin, Liebmann (2006) propose 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 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 de minimum (*maximum*) de la courbe d'« anomalous accumulation ».

Dans cette étude, la méthode de Liebmann est retenue car elle présente quelques 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 informatiquement.

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. Ainsi, ces deux seuils sont considérés dans cette étude.

2.3. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso

2.3.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels

Au-delà des cartes de synthèses mensuelles qui peuvent être obtenues depuis 1998, le fait de disposer de huit années 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, indépendant 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 2006.

2.3.2. Variabilité de la temporalité de la saison pluviométrique

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. Les paramètres calculés sont mis en relation avec les pratiques agricoles des différentes régions de production du soja au Mato Grosso. Trois communes représentatives des trois principales régions de production sont prises en exemple (figure 1). Il s'agit de Sapezal (région ouest), Sorriso (région centre) et Rondonopolis (région sud-est). 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 2005-06).

Enfin, les paramètres de la saison pluvieuse dépendent fortement du seuil choisi. Par exemple, les tests réalisés avec un seuil de 2,2 mm déterminent un début des pluies anticipé par rapport au début des pluies calculé avec un seuil de 5,1 mm. Le temps écoulé entre ces deux estimations de dates de début des pluies fournit alors une bonne indication sur la viabilité d'un soja semé dès le début des pluies au seuil le plus bas. En effet, s'il s'avère que cet intervalle de temps est largement supérieur aux sept jours de la phase de semis-émergence (Rosolem, 2006), cela signifie qu'un soja semé trop tôt peut être confronté à une période sèche qui peut s'avérer préjudiciable par la suite.

3. Variabilité spatiotemporelle des caractéristiques de la saison des pluies au Mato Grosso

3.1. 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 2 présente les résultats des critères statistiques définis par Laurent *et al.* (1998) et obtenus pour différents pas de temps.

		Critère statistique			
		Coefficient de corrélation	Biais	RMSE	Indice de Nash
Pas de temps	30 jours	0,88	11,64	62,97	0,75
	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 2 : Coefficients de corrélation linéaire, biais, RMSE et indice de Nash calculés à différents pas de temps entre les données TRMM 3B42 et les données au sol pour 116 stations du Mato Grosso entre 01/08/2004 et 31/07/2005. *Linear correlation coefficients, bias, RMSE and Nash index calculated at various temporal scales between TRMM 3B42 data and 116 ground raingauges data in Mato Grosso between 2004/08/01 and 2005/07/31.*

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 intervalle 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 $RMSE_5 = 25,36$). 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 ».

3.2. Analyse spatiotemporelle des précipitations au Mato Grosso

3.2.1. Variabilité des cumuls pluviométriques mensuels

La carte des précipitations annuelles (figure 2) 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 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 3) 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).

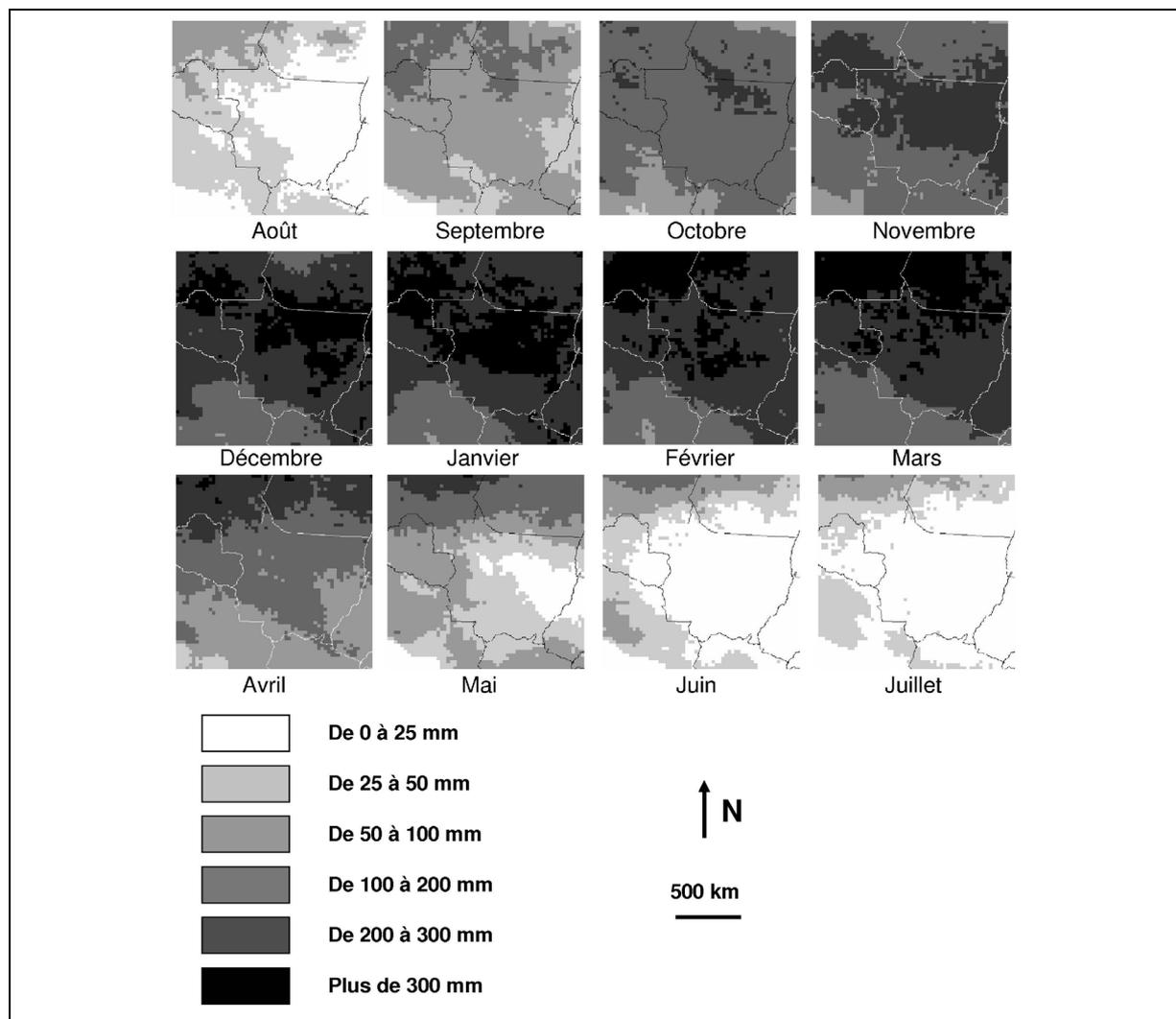


Figure 3 : Précipitations moyennes mensuelles (1998-2006) estimées par TRMM 3B42 (mm). *Mean monthly rainfall (1998-2006) estimated by TRMM 3B42 (mm).*

Les synthèses TRMM 3B42 servent aussi de données d'entrée pour une Analyse en Composantes Principales (ACP) 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). 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 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 où il pleut beaucoup au sud-ouest où il pleut peu : 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 toutes les années ; 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.

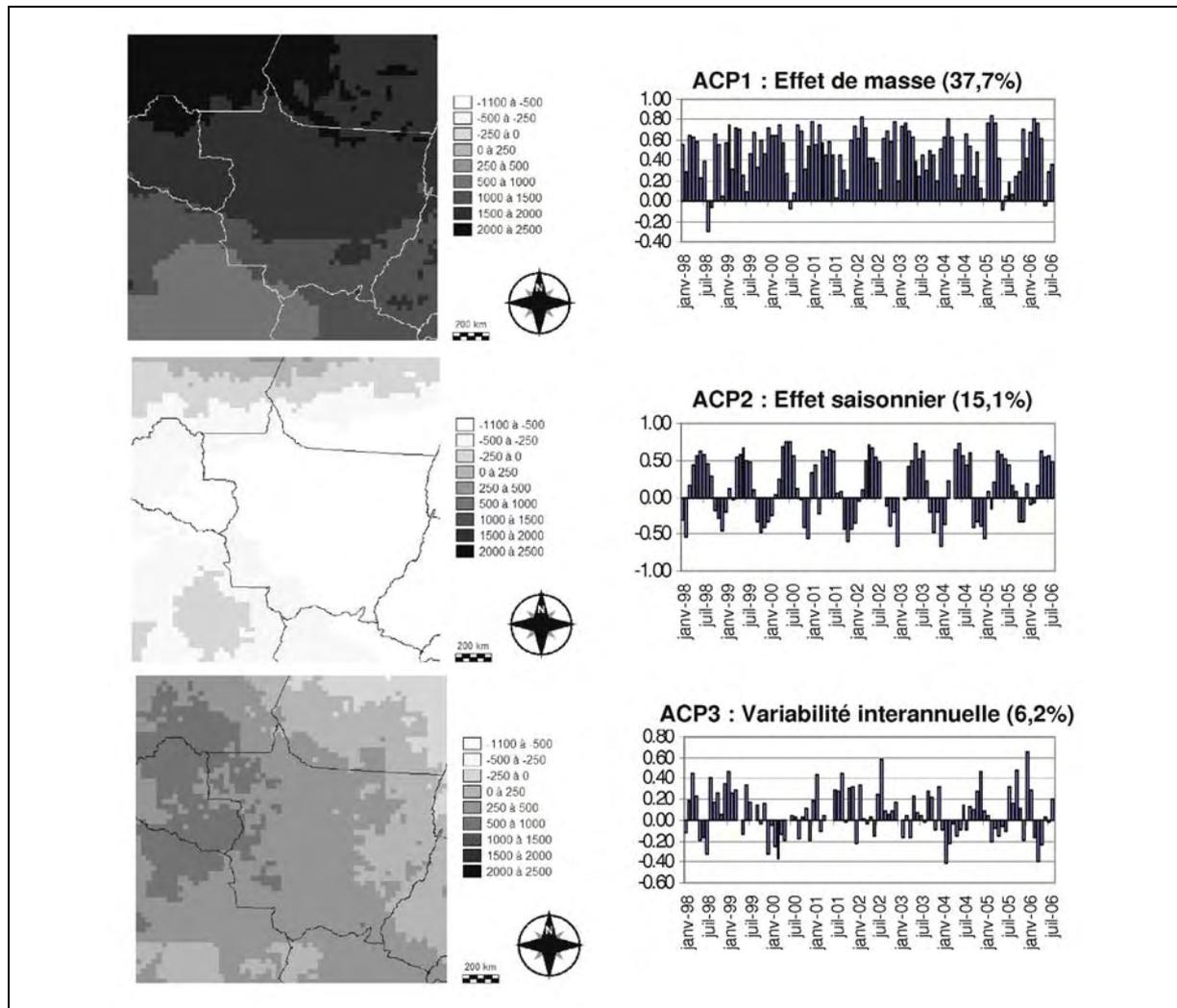


Figure 4 : Résultats d'une ACP sans rotation sur les totaux pluviométriques mensuels bruts TRMM (janvier 1998 à juillet 2006) : à gauche, les composantes spatiales et à droite, les chroniques des 3 premières composantes de l'ACP. *Results of a PCA applied on gross TRMM monthly mean rainfall (January 1998 to July 2005): spatial components on the left and temporal components on the right for the 3 main components.*

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 3.

Les résultats de la troisième composante permettent de caractériser surtout 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 des périodes plus pluvieuses (de décembre 1998 à

juillet 1999, par exemple) et d'autres plus sèches, comme de décembre 1999 à juin 2001, tandis qu'elles sont respectivement plus sèches et plus pluvieuses à l'est. La variabilité dans ce cas se décline à l'échelle interannuelle. Sachant que la variabilité interannuelle des pluies dans le nord du bassin amazonien et dans une partie du bassin de La Plata 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), 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 pluvio-gènes 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.

3.2.2. Variabilité de la temporalité de la saison pluviométrique

La méthode de Liebmann (2006) a été appliquée sur les données d'estimation des pluies issues des produits tri-horaires TRMM 3B42. Des précipitations pentadaires ont été calculées sur la période allant d'août 1998 à juillet 2006. 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 huit années pluviométriques. Les communes de Sapezal, Sorriso et Rondonopolis sont prises en exemple (tableau 3) pour étudier la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans les régions de production du soja.

Paramètres	Sapezal	Sorriso	Rondonopolis
Cumul annuel de précipitations (mm)	1796	1899	1520
Durée de la saison des pluies (seuil = 2,2 mm)	217	216	208
Durée de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	156	169	149
Nombre de jours moyen (durées des pluies) selon le seuil	61	48	59
Durée de la saison des pluies la plus longue (1998-05)	172	177	169
Durée de la saison des pluies la plus courte (1998-05)	129	151	119
Variabilité de la durée de la saison des pluies (jours)	43	26	50
Début de la saison des pluies (seuil = 2,2 mm)	15/9	16/9	18/9
Début de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	25/10	11/10	28/10
Nombre de jours moyen (dates de début) selon le seuil	39	26	40
Date du début des pluies le plus tardif (1998-05)	3/12	31/10	1/12
Date du début des pluies la plus précoce (1998-05)	30/9	29/9	24/9
Variabilité du début des pluies (jours)	64	32	68
Fin de la saison des pluies (seuil = 2,2 mm)	20/4	20/4	14/4
Fin de la saison des pluies (seuil = 5,1 mm)	30/3	29/3	26/3
Nombre de jours moyen (dates de fin) selon le seuil	22	22	19
Date de fin des pluies la plus tardive (1999-06)	11/4	12/4	10/4
Date de fin des pluies la plus précoce (1999-06)	10/3	20/3	27/2
Variabilité du début des pluies (jours)	32	23	42

Tableau 3 : Paramètres de la saison des pluies pour les trois communes prises en exemple dans l'étude : Sapezal, Sorriso et Rondonopolis. *Rainy season parameters for the three studied municipalities: Sapezal, Sorriso et Rondonopolis.*

La différence moyenne entre les dates de début des pluies avec les deux seuils varie entre 26 jours à Sorriso, 39 à Sapezal et 40 à Rondonópolis. Ceci indique qu'en se basant sur un seuil à 2,2 mm, le début de la saison pluvieuse intervient en fait relativement tôt et uniformément sur le territoire (entre le 15 et le 18 septembre en moyenne dans les trois communes), en risquant fortement d'être perturbée par une éventuelle période sèche postérieure. Ainsi, autant que possible, les producteurs devraient baser le semis sur le seuil à 5,1 mm plutôt que sur le seuil à 2,2 mm. Pour la suite de l'étude, c'est donc ce seuil de 5,1 mm qui est retenu.

Le début de la saison des pluies s'organise selon une orientation NW-SE (figure 5a). 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), situé entre deux régions de fortes précipitations, 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 5b) intervient au mois de mars sur la majeure partie centrale du Mato Grosso.

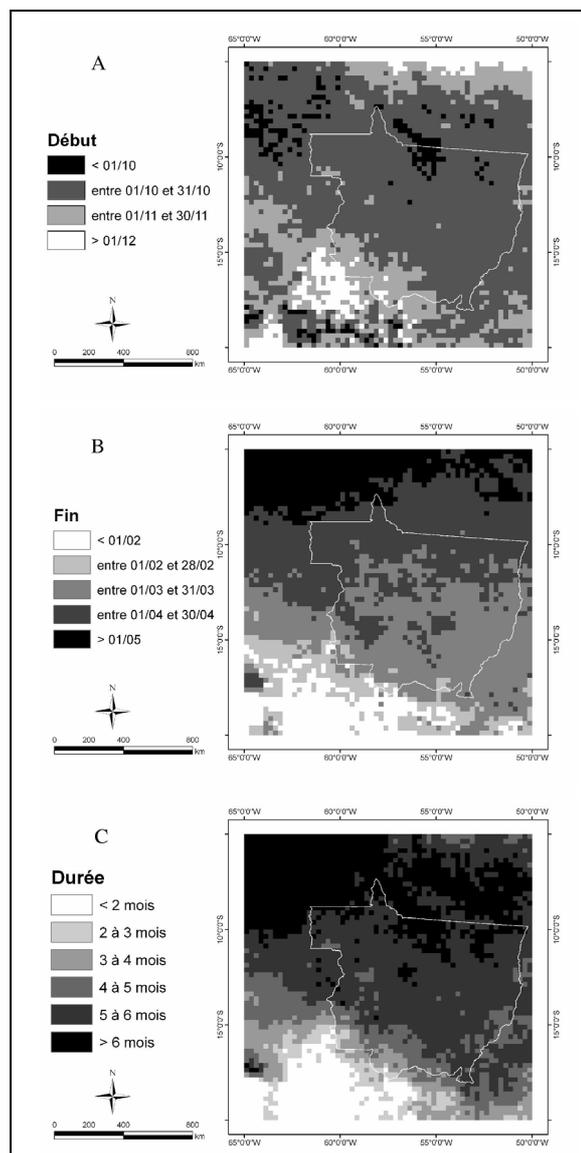


Figure 5 : Cartes des paramètres de la saison des pluies calculés à partir de la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann, 2006), avec un seuil égal à 5,1 mm (moyenne 1998-2006) : dates de début (A) et fin (B) de la saison des pluies, durée de la saison des pluies (C). *Maps of the rainy season parameters calculated using the « Anomalous Accumulation » method (Liebmann, 2006), with a 5.1 mm threshold (1998-2006 average): dates of onset (top) and end (centre) of the rainy season are presented as well as its duration (bottom).*

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 Guimaraes où quelques précipitations d'automne retardent la fin de la saison pluvieuse au mois d'avril. La durée de la saison des pluies (figure 5c) 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 6 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 en fait 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.

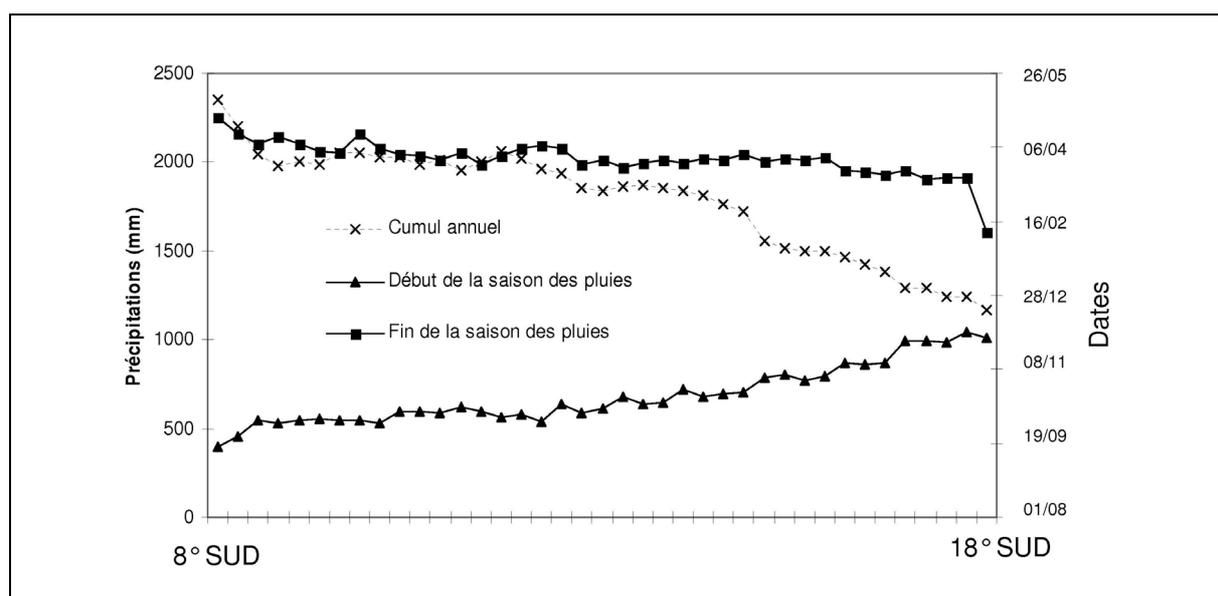
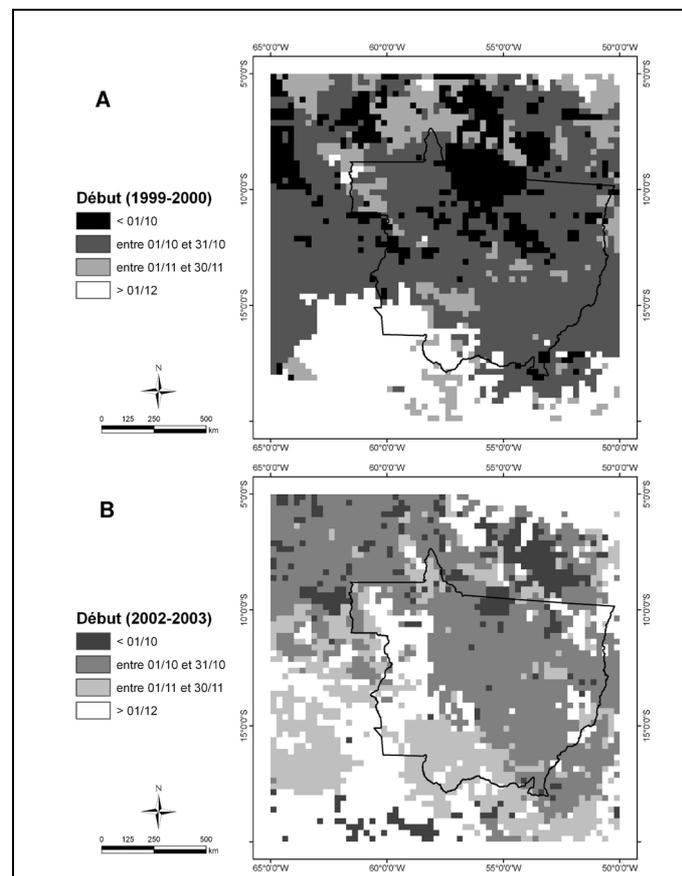


Figure 6 : Gradient nord/sud des paramètres de la saison des pluies calculés par la méthode « Anomalous Accumulation » (Liebmann, 2006) avec un seuil égal à 5,1 mm. Les dates de début et fin de la saison des pluies sont indiquées sur l'ordonnée de droite (la durée de la saison des pluies correspond à 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. *North/south gradient of the rainy season parameters calculated using the « Anomalous Accumulation » method (Liebmann, 2006) with a 5.1mm threshold. Dates of onset and end of the rainy season are indicated on the right Y axis (the duration of the rainy season is the difference between the onset and end lines). Moreover, annual precipitations are presented and defined on the left Y axis.*

Après avoir présenté les données moyennées sur huit ans, deux années sont prises en exemple 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 7b), notamment au sud-ouest de l'Etat et dans l'Etat voisin du Para au nord-est, où est apparent le « couloir sec amazonien ». Au contraire, en 1999-2000 (figure 7a), 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. En conséquence, ceux-ci peuvent entraîner des baisses de précipitations en saison humide (comme cela se produit au nord de l'Amazonie) et des augmentations en printemps et hiver austral (de mars à août) suivant 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 3 communes prises en exemple, 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.

Figure 7 : Début de la saison des pluies calculé pour 1999-2000 (A) et 2002-2003 (B). *Rainy season onset calculated for 1999-2000 (A) and 2002-2003 (B).*



L'étude des paramètres de la saison des pluies peut enfin permettre de mieux comprendre les calendriers agricoles du Mato Grosso. Les résultats indiquent que le début de la saison des pluies commence d'abord à Sorriso (11 octobre en moyenne), puis à Sapezal et Rondonópolis (25 et 28 octobre respectivement). La différence entre les dates de début de saison des pluies de deux communes situées à une même latitude (comme Sorriso et Sapezal) 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. De plus, les reliefs du Rondonia et du plateau des Parecis peuvent gêner la mise en place des flux de NW à Sapezal.

Ces dates correspondent aux calendriers agricoles appliqués dans ces régions. La région de Sorriso commence à semer le soja très précocement dans l'année, à partir de fin septembre/début octobre, tandis que les régions de Sapezal et Rondonopolis sèment plus tardivement d'environ 15 jours (Arvor *et al.*, 2007). De plus, la variabilité interannuelle semble plus forte à Sapezal et Rondonopolis, puisque la différence entre le maximum et le minimum est supérieure à deux mois, variant entre fin septembre et début décembre, ce qui accentue la vulnérabilité aux aléas climatiques dans ces régions. A Sorriso, le début des pluies intervient entre fin septembre et fin octobre, avec une variabilité donc plus faible (un mois). L'impact de cette variabilité interannuelle sur le secteur agricole peut se faire fortement ressentir à l'échelle municipale. Par exemple, en 2004-2005, la saison pluvieuse a commencé fin octobre-début novembre à Sorriso. Ainsi, le semis du soja a été retardé et la culture de maïs en succession n'a pas pu se faire comme les autres années. En conséquence, les données de l'IBGE (Institut Brésilien de Géographie et Statistique) montrent une baisse de la surface cultivée en maïs cette même année de 40 000 ha à Sorriso (100 000 ha en 2003-04 contre 60 000 ha en 2004-05 et 95 000 ha en 2005-2006).

La bonne tenue de cette deuxième culture est en effet dépendante de la date de fin des précipitations et tout retard dans la date de semis peut se traduire par une perte de productivité en cas de fin des pluies précoce. Or, la fin de la saison pluvieuse est plus régulière puisqu'elle intervient en moyenne aux mêmes moments dans les trois communes (entre le 26 et le 30 mars) avec une plus faible variabilité interannuelle (entre 23 à Sorriso et 42 jours à Rondonopolis). Pour ces raisons, il est donc risqué de semer la deuxième culture tardivement en espérant profiter d'une fin de saison des pluies également tardive. Sorriso dispose alors d'une saison pluvieuse plus longue (169 jours) qu'à Sapezal et Rondonopolis (156 et 149 jours). Ces différences expliquent en partie le fait qu'une deuxième culture est plus souvent semée après la récolte de soja dans la région de Sorriso (Arvor *et al.*, 2008).

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 données TRMM 3B42 (Tropical Rainfall Measuring Rainfall) sont notamment reconnues pour leur qualité liée à l'utilisation de données multi-sources (micro-ondes, infrarouge et données au sol) dans les algorithmes d'estimations. Leur emploi dans une région telle que l'Amazonie et, plus particulièrement l'Etat du Mato Grosso, s'avère très intéressant. D'une part, elles permettent de spatialiser la pluviométrie de la région à partir des moyennes mensuelles sur huit ans d'étude (1998-1999 à 2005-2006) ; 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, l'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.

La variabilité spatiotemporelle de la saison pluvieuse analysée pour trois communes de production de soja permet également de mieux comprendre les pratiques culturales du Mato Grosso. La durée de la saison des pluies varie de plus en de 15 jours en moyenne entre les principales régions de production et explique ainsi pourquoi les producteurs de Sorriso sèment plus de maïs en succession du soja. Par ailleurs, la date de début des pluies varie de plus de 2 mois sur la période d'étude 1998-2006 ce qui peut expliquer des brusques changements de pratiques culturales, comme en 2004-2005 où la récolte de maïs a été réduite à Sorriso. Ainsi, ces données permettent de cerner les sources de la vulnérabilité des producteurs vis-à-vis des aléas climatiques. Le couplage des informations fournies par les produits TRMM 3B42 avec d'autres données satellitaires telles que les indices de végétation issus du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la plateforme TERRA pourraient permettre de réaliser un suivi des cultures de soja. Cependant, la grande différence de résolution spatiale entre ces deux sources d'information (250 m pour MODIS contre 0,25° pour TRMM) représente pour l'instant une limite importante à l'utilisation combinée de ces produits.

Remerciements : Ce travail a été appuyé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet DURAMAZ ("Analyse de projets de développement durable en Amazonie") ainsi que par le CNPq dans le cadre du projet ENVIAR et par l'IAI (InterAmerican Institute for Global Change Research) dans le cadre du projet CRN2 ("*Land use change in the Rio de la Prata Basin : linking biophysical and human factors to predict trends, assess impacts and support viable strategies for the future*").

Bibliographie

- ACEITUNO P., 1988 : On the functioning of the southern oscillation in the South American sector: surface, climate. *Monthly Water Review*, **116**, 505-524.
- ARVOR D., SANT'ANNA NETO J. L., DUBREUIL V., ALMEIDA I. V. et MEIRELLES M. S. P., 2007 : Análise dos perfis temporais de EVI/MODIS para o monitoramento da cultura da soja no Estado de Mato Grosso. *XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Florianópolis (Brésil), 21-26 avril 2007, 51-58.
- ARVOR D., MEIRELLES M. S. P., MARTORANO L. G., JONATHAN M., DUBREUIL V., HERLIN I. et BERROIR J.-P., 2008 : Séries temporais de EVI/MODIS na identificação da dinâmica da Soja em Sistema Plantio Direto no Mato Grosso, Brasil. *XVII RBMCSA*, Rio de Janeiro (Brésil), 10-15 août 2008, 4 pages, sous presse.
- 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**, 15-22.
- CADET D. et GUILLOT B., 1991 : EPSAT : Estimation des pluies par satellite. ORSTOM Editeur, 63 pages.
- 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**, 88-108.
- 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 1º simposio de geotecnologias no Pantanal*, Campo Grande (Brésil), 11-15 novembre 2006, 47-56.

- COLLISCHONN B., ALLASIA D., COLLISCHONN W. et TUCCI C. E. M., 2007 : Desempenho do satellite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. *Revista Brasileira de Cartografia*, **59**, 93-99.
- 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.
- 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*. Doctorat de géographie de l'université de Aix-Marseille, 279 pages.
- FIGUEROA S. N. et NOBRE C. A., 1990 : Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanalse*, **6**, 36-40.
- 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**, 47-66.
- GARREAUD R. D., 2000 : Cold air incursions over Subtropical South America: Mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, **128**, 2544-2559.
- GARREAUD R. D. et WALLACE J. M., 1998 : Summertime incursions of mid-latitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, **126**, 2713-2733.
- GRIMES D. I. F., PARDO-IGUZQUIZA E. et BONIFACIO R., 1999 : Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, **222**, 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**, 263-280.
- GRIMM A. M., 2004 : How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, **22**, 123-138.
- GUILLOT B., 1996 : Problèmes de validation des méthodes d'estimation des précipitations par satellite en Afrique Intertropicale. ORSTOM Editeur, 228 pages.
- HUFFMAN G. J., ADLER R. F., ARKIN P., CHANG A., FERRARO R., GRUBER A., JANOWIAK J., McNAB A., RUDOLPH B. et SCHNEIDER U., 1995 : 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.
- 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 de Rennes 2, 108 pages.
- JOBARD I., 2001 : Status of satellite retrieval of rainfall at different scales using multi-source data. *MEGHA-TROPHIQUES 2nd Scientific Workshop, 2-6 juillet 2001, Paris, France*, 10 pages.
- LAURENT H., JOBARD I. et TOMA A., 1998 : Validation of satellite and ground-based estimates of precipitation over the Sahel. *Atmospheric Research*, **47-48**, 651-670.
- LIEBMANN B., 2006 : A definition for onset and end of the rainy season. Site internet : www.eol.ucar.edu/projects/cppa/meetings/200608/posters/brant.pdf. Accédé le 12/02/2007.

- LIEBMANN B. et MARENGO J. A., 2001 : Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazonia. *Journal of Climate*, **14**, 4308-4318.
- MARENGO J. A., 1992 : Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, **12**, 853-863.
- MARENGO J. A., LIEBMANN B., KOUSKY V. E., FILIZOLA N. P. et WAINER I. C., 2001 : Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. *American Meteorological Society*, **14**, 833-852.
- NOGUES-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. O., 2006 : Determining rainy season onset and retreat over Nigeria from precipitation amount and number of rainy days. *Theoretical and Applied Climatology*, **83**, 193-201.
- PETTY G. W., 1995 : The status of satellite-based rainfall estimation over land. *Remote Sensing of Environment*, **51**, 125-137.
- RATISBONA L. R., 1976 : *The climate of Brazil*. In: *Climates of Central and South America*, World Survey of Climatology, Elsevier Scientific publishing Company, vol. 12, 219-293.
- 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**, 1663-1686.
- ROSOLEM C. A., 2006 : Ecofisiologia da soja. *Boletim de pesquisa de soja 2006*, Fundação MT, 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 simulation numériques*. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, 199 pages.
- SELUCHI M. et MARENGO JA., 2000 : Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climates aspects and examples of intense events. *International Journal of Climatology*, **20**, 1167-1190.
- 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 l'Université São Paulo, 375 pages.
- 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**, 143-148.
- SIMPSON J., KUMMEROW C., TAO W.-K. et ADLER R. F., 1996 : On the tropical rainfall measuring mission (TRMM). *Meteorology and Atmospheric Physics*, **60**, 19-36.
- 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**, 540-558.
- ZHOU J. et LAU K.M., 1998 : Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate*, **11**, 1020-1040.

Références des données obtenues sur internet :

Tropical Rainfall Mapping Mission (TRMM) : accédé en mai 2006 et février 2007 : http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM_DP/01_Data_Products/02_Gridded/06_3-hour_Gpi_Cal_3B_42/

Données pluviométriques de l'ANA (sistema de informações hidrologicas de l'Agencia Nacional de Aguas, Brésil) : accédé en mai 2006 et février 2007 : <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

INPE (données de déforestation de l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brésil). Projeto PRODES : http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2007.htm (accédé en avril 2008).

Données de Multivariate ENSO index : accédé en mai 2008 : <http://www.cdc.noaa.gov/peaopel/klaus.wolker/MEI/>

Données de températures de surface océanique : accédé en mai 2008 : <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List/>

Données topographiques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) : accédé en mai 2008 : <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>