

ESTIMATION DES PRECIPITATIONS PAR TELEDETECTION AU MATO GROSSO (BRESIL)

V. DUBREUIL⁽¹⁾, A. JALLET⁽¹⁾, J. RONCHAIL⁽²⁾
et G. MAITELLI⁽³⁾

(1) COSTEL / LETG - UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2. vincent.dubreuil@uhb.fr

(2) IRD / Agência Nacional da Agua, Brasília. josyane@ana.gov.br

(3) Universidade Federale do Mato Grosso a Cuiaba. maitelli@terra.br

Résumé

Dans les régions des fronts pionniers du centre du Mato Grosso, les rendements des cultures implantées par les colons depuis une vingtaine d'années (soja, canne à sucre, coton, maïs) sont encore largement tributaires de la variabilité pluviométrique interannuelle ; cependant l'estimation à échelle fine des précipitations est impossible étant donné les lacunes du réseau d'observation au sol. Nous avons choisi d'utiliser les données infrarouge GOES-8 à pleine résolution (4km) pour essayer de répondre à cette question. Un premier jeu de données a été constitué en retenant pour chaque mois la valeur maximale de la température observée pour chaque pixel afin de ne conserver que l'émission en provenance du sol dont l'intensité est surtout fonction de la quantité de pluie reçue. Un second jeu de données a été constitué en seuillant les mêmes images à partir de -40°C : ainsi, l'occurrence des nuages à sommet froid pluviogènes peut être également suivie au pas de temps mensuel. Les résultats calculés sur la période de septembre 1999 à août 2000 montrent que les pluies mesurées au sol sont mieux corrélées aux occurrences ($r=0.86$) qu'avec les températures maximales ($r=-0.65$). Les bons résultats obtenus aux pas de temps mensuels et annuels permettent de réaliser une cartographie des précipitations par satellite qui fait clairement ressortir l'influence de la topographie.

Mots-clés : Précipitations, télédétection, Amazonie

Abstract

Rainfall estimating using remote sensing in Mato Grosso (Brazil)

Following the national strategy of regional occupation, colonization projects initiated both by the Brazilian government and private companies, played a major role in the process of deforestation and development of the State of Mato Grosso in the 1970's. This process involved the expansion of planting crops such as soy-beans, maize and cotton but, because of the lack of meteorological stations before the settlements, many gatherings of crops suffered from the rainfall variability. Concurrently, the low density (one point for 15000km²) and the bad quality (frequently more than 20% of missing values) of the current meteorological network did not allow to draw detailed maps of rainfall. This paper focuses on the interest of GOES-8 images for estimating rainfall with a better spatial accuracy.

The climate in the study area is classified as equatorial or tropical hot and wet. The well-defined dry season lasts from June to August in the northern part of Mato Grosso, while it lasts from April to October in the south. In the same way, the annual average precipitation decreases from 2500mm in the north to less than 1000mm in the Pantanal. We chose to study the period between September 1999 and August 2000 because of the availability of satellite data and of rainfall observations for more than 200 stations located between 5°S – 20°S and 50°W – 65°W.

As ground-based techniques such as those using rain gauges and radar suffer from spatial and/or temporal coverage problems, the measurement of rainfall from satellites has been a very active field of study. There are two primary means of measuring rainfall from satellite-based sensors. Historically, the first ones were infrared methods which are based on the relationship between cloud top temperatures (observed by geostationary satellites) and the rainfall intensity. The second ones used data from passive microwave sensors based on polar-orbiting satellites (DMSP). Although microwave radiances have a good physical connection with rain rate, the low spatial and frequency coverages are a strong limitation for an accurate mesoscale mapping of rainfall. Therefore, we chose to use infrared images from geostationary satellites GOES for estimating the monthly rainfall in the state of Mato Grosso. A first dataset was obtained by selecting, for each month, the maximum value of the observed temperature (TBmax). A second one was made counting for each pixel the occurrence of values of temperatures less than -40°C (cold-top cloud occurrence).

The best results were observed for monthly values whereas the correlations for decades values were the lowest ones. For all the months, the results obtained with the occurrences of high-level-clouds were better ($r=0.86$) than those calculated with the maximum temperature compositing ($r=-0.65$). This could be related to the high diversity of landscapes in Mato Grosso which leads to a great variability of surface temperatures. The good agreement between the measured rainfall and the cold-top cloud occurrences allowed us to estimate the amount of rainfall for the whole year; this technique permitted an improvement of the knowledge of the spatial distribution of rainfall with a 4km resolution. Satellite data also confirmed the role of the topography in the amount of rainfall: the main reliefs showed more rainy conditions, phenomenon that cannot be observed with the rainfall ground network.

Keywords : Rainfall, Remote Sensing, Amazonia

Introduction

Situé dans la partie méridionale de l'Amazonie brésilienne, l'Etat du Mato Grosso a connu un formidable développement économique depuis une trentaine d'années. Ce phénomène résulte d'une politique active de mise en valeur du territoire voulue par les gouvernements successifs. Le résultat a été une extension très rapide du front pionnier du centre-ouest du Brésil qui a ainsi vu arriver des centaines de milliers de colons déboisant des dizaines de milliers d'hectares de forêts et de savanes. Cette mise en valeur, essentiellement agricole, a été conduite sans qu'aucune recherche climatologique préalable n'ait vraiment pu être menée et, rapidement, les aléas de la pluviométrie ont entraîné

des chutes spectaculaires des rendements des cultures certaines années. L'absence d'un réseau d'observation météorologique de qualité, caractéristique propre aux régions peu densément peuplées et récemment mises en valeur, nécessite d'avoir recours à la télédétection pour toute étude climatologique fine. Cet article propose de montrer comment les données infrarouge des satellites géostationnaires GOES peuvent pallier la faible densité du réseau d'observation classique du Mato Grosso afin de proposer une cartographie des précipitations à une échelle régionale pour l'année climatologique 1999-2000.

1. Le Mato Grosso : une région mal connue sur le plan climatique

1.1. Agriculture et pluviométrie au Mato Grosso

Dans le cadre de l'agriculture pluviale tropicale, la durée et l'intensité de la saison des pluies sont des données cruciales pour permettre aux agriculteurs de tirer les meilleurs revenus de leurs terres. Dans les régions des fronts pionniers du centre du Mato Grosso, les produits cultivés par les colons depuis une vingtaine d'années sont dominés par le soja, la canne à sucre, le coton et le maïs (Dubreuil, 2002). La longueur de la saison des pluies, étalée sur 6 à 8 mois, permet une double culture : la *safrá*, culture principale du cœur de la saison des pluies récoltée en février et la *safrinha* (littéralement « petite culture ») pratiquée en fin de saison pluvieuse, après la récolte principale. Les totaux pluviométriques conséquents de la saison pluvieuse permettent de bons rendements en soja (30 quintaux par hectares environ) ou en maïs (60 quintaux par hectare) ; certaines années moins arrosées connaissent cependant des rendements plus faibles : 1997 est ainsi considérée comme l'année noire dans les mémoires. Parfois, l'interruption des précipitations plus ou moins prolongée de 2 à 3 semaines au cœur de la saison des pluies, phénomène connu sous le nom de *veranico* (Dantas et Geraldini, 1997), pose problème, à tel point que certaines grandes *fazendas* se sont équipées de systèmes d'irrigation.

Mais c'est surtout la seconde récolte de l'année (*safrinha*) qui est particulièrement compromise en cas de faibles précipitations : pour le maïs, les rendements moyens n'atteignent alors même pas 18 quintaux à l'hectare contre le double en année pluvieuse. Au contraire, l'arrivée de pluies pendant la saison sèche est problématique pour des cultures traditionnelles du Mato Grosso : ainsi, dans le nord de l'Etat, les récoltes de *castanha do Para* (noix du Brésil) et du *guarana* ont été divisées par deux entre 2001 et 2002. Finalement, malgré la volonté politique de faire du Mato Grosso le premier Etat agricole du Brésil, les contraintes climatiques restent fortes et continuent à rendre aléatoire la première source de revenu de cette région. La connaissance de la répartition spatiale des précipitations et surtout leur estimation à échelle fine deviennent alors essentielles pour le suivi et la qualité de ces cultures. Le problème est que les données disponibles sont rares et que la colonisation agricole de cette partie de

l'Amazonie s'est réalisée sans disposer au préalable d'une bonne connaissance du contexte climatique.

1.2. Les lacunes des données d'observation au sol

La connaissance climatologique de la partie méridionale de l'Amazonie brésilienne est très lacunaire (Nimer, 1989). Les postes de mesures sont peu nombreux, souvent peu entretenus et n'ont été installés que depuis les années 1970, lors des débuts de la colonisation agricole (Sette, 2000). Sur un espace de plus d'un million de kilomètres carrés, seules les données d'une dizaine de postes de l'INMET (Institut National de Météorologie brésilien) avaient pu être utilisées lors d'une première étude (Dubreuil et al., 2000) : il s'agissait alors des seules mesures disponibles, contrôlées et réalisées par des observateurs spécialement formés. Les données de l'EMPAER (Empresa Mato-Grossense de Pesquisa, Assistência e Extensao Rural), organisme qui a assuré la mise en place d'une quinzaine de stations automatiques dans tout l'Etat, ne peuvent plus être utilisées en raison du mauvais état de fonctionnement de ces stations (la plupart arrêtées quelques mois après leur installation faute de moyens pour les entretenir).

Depuis quelques années, des données de postes complémentaires ont pu être collectées dans le cadre du programme HiBAM de l'IRD en collaboration avec l'ANEEL (Agence Nationale de l'Énergie Électrique), l'ANA (Agence Nationale de l'Eau) et le SENAMHI (Service National de Météorologie et d'Hydrologie de Bolivie). Ces données pluviométriques proviennent en fait de sources diverses (réseau propre de l'ANEEL-ANA, fazendas, sociétés de colonisation, municipalités...) qui n'utilisent pas toujours le même type d'instruments et dont la localisation géographique est parfois imprécise. Cependant, en l'absence d'autres sources et en raison de l'impossibilité matérielle de pouvoir vérifier l'ensemble des stations sur le terrain, nous utiliserons ces données des fichiers de l'ANA pour comparer avec les données de télédétection.

Sur la région d'étude représentant un cadre de 15° de longitude sur 15° de latitude ce sont maintenant près de 200 postes dont les mesures de précipitations sont disponibles. Cela ne représente cependant qu'un point de mesure pour environ 15000 km², ce qui reste insuffisant pour une étude à échelle régionale. La carte de la figure 1 montre d'ailleurs l'inégale densité du réseau avec des vides problématiques dans le sud-ouest du Rondônia, le sud du Para ou dans le sud-est bolivien. En outre, la plupart de ces stations sont de création récente, la moitié d'entre elles étant en service depuis moins de 20 ans. La carte de la figure 1 indiquant la date de création des stations montre que seules certaines stations du sud du Mato Grosso disposent de longues séries : Cuiaba depuis 1901, Corumba et Caceres depuis 1912, Diamantino depuis 1932, Sangradouro depuis 1925 (mais arrêtée en 1976). Au nord, seule la station d'Alto Tapajos est de création ancienne (1925) mais elle n'est plus en fonction depuis une trentaine

d'années. La carte montre surtout une opposition entre le tiers méridional de l'Etat du Mato Grosso (et la Bolivie), où les séries pluviométriques dépassent la trentaine d'années, et les régions au nord du 15°S où les stations ne sont installées que depuis la fin des années 70 voire plus récemment : ainsi, au nord, les stations ont été mises en place au début des installations des programmes de colonisation agricole : Vera et Porto dos Gauchos en 1973, Alta Floresta en 1978, pour les plus anciennes. Finalement, cette répartition spatiale résume l'histoire de la mise en valeur du Mato Grosso (Etat « jeune » créé en 1979) et le déplacement du front pionnier du sud vers le nord de l'état. A l'heure actuelle, l'installation de nouvelles stations reste d'ailleurs dépendante des mouvements de population et elle ne se fait donc pas suivant une logique précise.

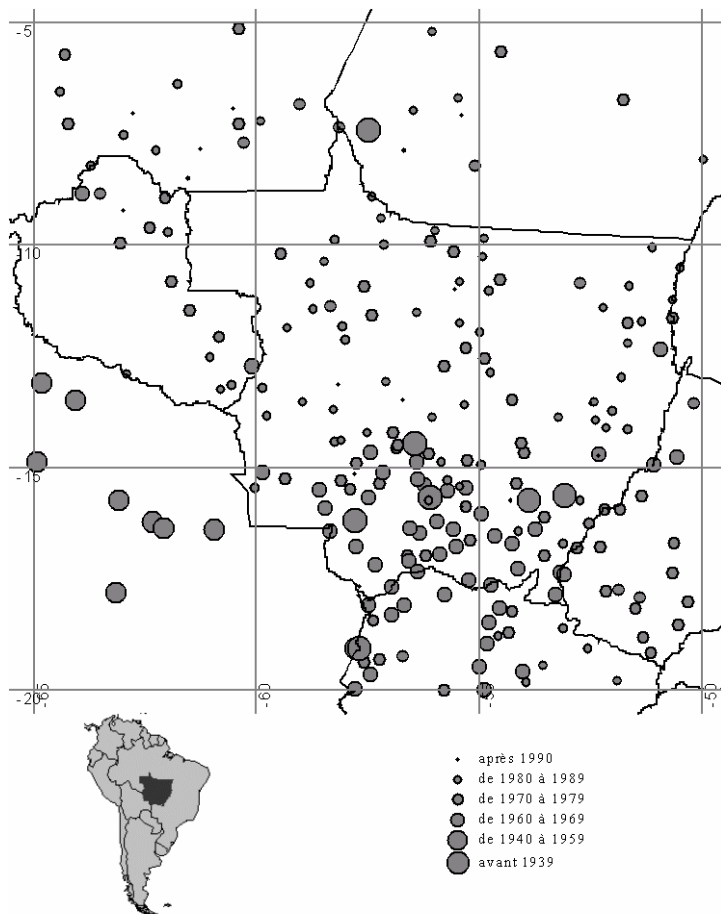


Figure 1 : Localisation et date de mise en service des postes pluviométriques.

La carte de la figure 2 permet de se faire une idée sur la qualité des observations. Outre le problème déjà mentionné de la diversité des appareils utilisés, le pourcentage de lacunes dans les séries pluviométriques mensuelles est également à souligner. Ainsi, près d'une série pluviométrique mensuelle sur deux présente un taux de données manquantes supérieur à 20% ! Le nombre de stations où le pourcentage de lacunes est supérieur à 30% est particulièrement dommageable dans le sud du Mato Grosso et le Mato Grosso do Sul au point d'occulter la relative qualité de la densité du réseau. On pourrait résumer la situation sous la forme suivante : réseau peu dense mais avec assez peu de lacunes au nord, réseau relativement dense mais avec beaucoup de lacunes au sud... Un tel état des lieux permet de comprendre la méconnaissance de cette région sur le plan climatologique traduit par une bibliographie assez peu fournie.

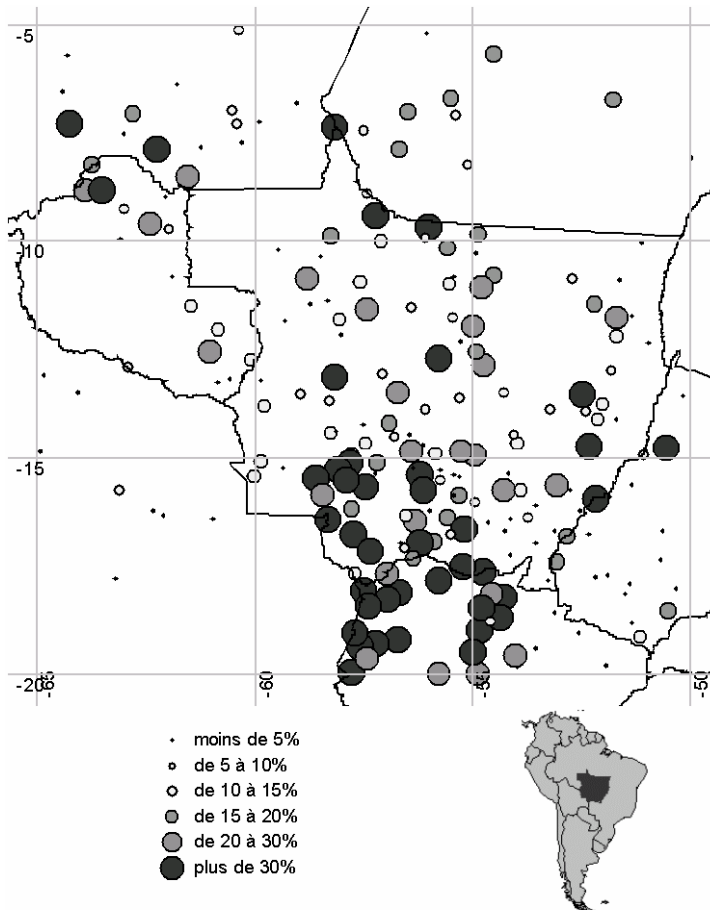


Figure 2 : Pourcentage de données manquantes dans les séries pluviométriques.

1.3. Un contexte climatique marqué par un gradient nord-ouest / sud-est

Le Mato Grosso se situe à la charnière entre le domaine équatorial au nord, celui de la forêt, et le domaine tropical au sud où dominent les paysages de savanes plus ou moins arborées, les *cerrados*. Comme partout dans la zone chaude, les rythmes climatiques sont d'abord et avant tout marqués par les précipitations, les températures restant, à de rares exceptions près, toujours élevées. Pour étudier le climat de cette région, les premiers travaux des auteurs brésiliens (Monteiro, 1951) ne pouvaient s'appuyer que sur quelques données de stations éloignées les unes des autres de plusieurs centaines de kilomètres. Dans les années 70, les premiers relevés des stations du nord du Mato Grosso ont pu être compilés dans le cadre du programme RADAMBRASIL (1983). Il faut en fait attendre les travaux de Nimer (1989) pour voir apparaître les premières cartographies climatiques sur cette région : mais les cartes ne montrent qu'une organisation climatologique assez simple à petite échelle (figure 3) illustrant le passage progressif d'un climat subéquatorial à courte saison sèche au nord à un climat tropical austral à saisons contrastées au sud (Roucou, 1997). La thèse de D.M. Sette (2000) est la première à utiliser l'ensemble des données pluviométriques du réseau de l'ANA et proposer une classification d'ensemble des climats du Mato Grosso. Pour elle, l'opposition climatique majeure au Mato Grosso est entre le climat équatorial, à saison sèche de 3 à 5 mois et recevant plus de 1800mm de précipitations annuelles et le climat tropical continental à saisons contrastées dont la saison sèche dure de 5 à 7 mois et dont les précipitations sont comprises entre 1200 et 1500mm. L'extension d'un climat équatorial aussi loin vers le sud (14°S) est exagérée mais elle correspond bien, au Mato Grosso, à la limite forêt-savanes ; en revanche, E.Nimer préfère limiter le climat équatorial à l'absence de mois secs... ce qui l'élimine du Mato Grosso et d'une bonne partie de l'Amazonie ! L'aspect apparemment contradictoire de ces approches résulte en fait de la difficulté à fixer un seuil précis dans un espace où la transition est progressive et le gradient spatial très peu marqué.

Ainsi, un gradient nord-ouest sud-est apparaît pour les précipitations annuelles : les totaux pluviométriques annuels moyens s'échelonnent de plus de 2500 mm dans l'extrême nord-ouest à des valeurs de l'ordre du mètre dans la dépression du Pantanal et moins de 800mm dans le sud-est bolivien. Le nombre de mois secs (figure 4), estimés selon les auteurs brésiliens soit par le rapport $P < 2T$ soit par le seuil de 60mm, augmente du nord (3 mois à Alta Floresta) au sud (5 mois à Cuiaba). Vers l'extrême sud-est le nombre de mois secs diminue (4 mois dans le Mato Grosso do Sul) du fait de la fréquence plus importante des passages pluvieux d'origine tempérée alors que vers le sud-ouest, on rentre progressivement dans les régions du Chaco bolivien où l'aridité devient plus sensible (plus de 6 mois secs). Tout autant que les mois faiblement arrosés, la répartition des mois très humides souligne cette opposition entre le nord et le sud : on passe ainsi de 3-4 mois très arrosés (plus de 300mm) au nord de 12°

sud à un seul mois au centre du Mato Grosso puis aucun mois très arrosé au sud de 15° sud. De même, le nombre de mois dont la moyenne est supérieure à 200 mm diminue rapidement vers le Mato Grosso do Sul et la Bolivie (5 à Diamantino, 4 à Cuiaba, 2 à Caceres, aucun à Corumba).

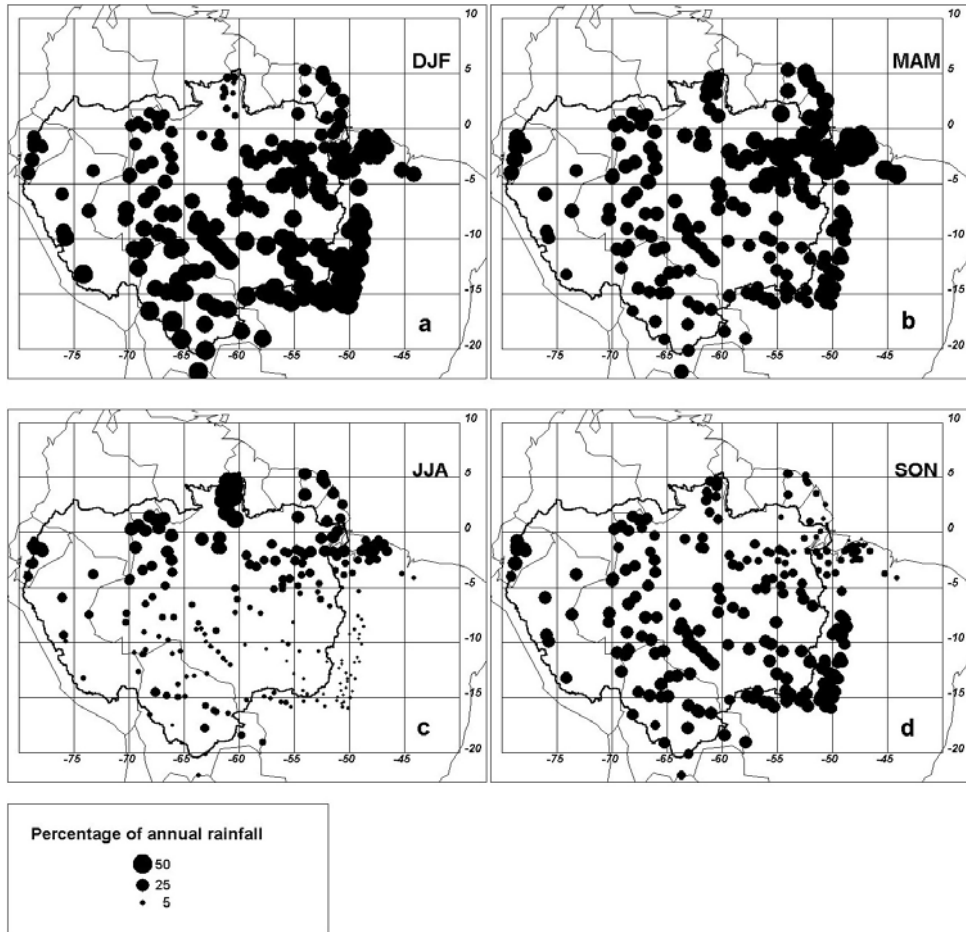


Figure 3 : Répartition saisonnière des précipitations du bassin amazonien (en pourcentage du volume annuel). D'après Ronchail et al. (2002).

Au total, la faible densité du réseau d'observation au sol et la médiocrité des séries disponibles imposent le recours aux données satellitaires pour une spatialisation à échelle fine de la pluviométrie.

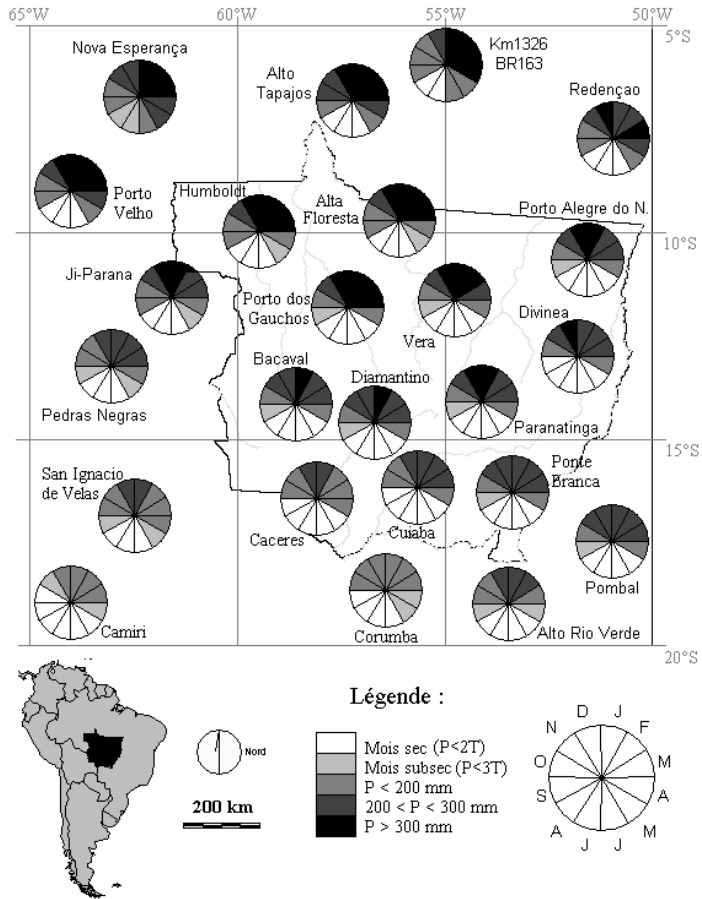


Figure 4 : Régimes pluviométriques moyens mensuels du Mato Grosso.

2. Apport des données satellitaires pour l'estimation des précipitations

2.1. La diversité des méthodes disponibles

Bien souvent, c'est donc dans le but de mieux appréhender les aléas pluviométriques que les pays ne possédant ni de réseaux de mesures au sol satisfaisants, ni même les moyens de les développer, ont fait appel aux informations fournies par la télédétection (Xie et Arkin, 1995). De ce fait, l'exploitation de données satellitaires pour l'estimation des précipitations n'a cessé de croître depuis une vingtaine d'années. Ces expériences ont donné lieu à plusieurs programmes internationaux de recherche : GPCP, Global Precipitation Climate Project (Wilkerson, 1988), CPC, Climate Prediction Center utilisant le Goes Precipitation Index (Herman et al., 1997) EPSAT, Estimation des Précipitations par Satellite (Guillot et al., 1994) pour l'Afrique de l'Ouest,

TAMSAT, Tropical Applications in Meteorology using Satellite data (Thorne et al., 2001). Plus récemment certains programmes comme celui sur l'étude de la mousson africaine (AMMA) sont venus rappeler la nécessité de disposer de jeux de données globaux en matière de suivi des systèmes précipitants. Après quelques expériences de suivi par imagerie visible, l'étude des précipitations par satellite s'est essentiellement effectuée de deux façons : par l'utilisation des données infrarouge, d'une part, et des données micro-ondes, d'autre part. Plus récemment, des méthodes combinées, utilisant simultanément les deux types de données, sont également apparues.

Les techniques utilisant l'infrarouge thermique ont été les premières utilisées : elles sont généralement fondées sur la relation indirecte existant entre :

- la température de sommet des nuages et l'intensité des précipitations : les algorithmes sont fondés sur le fait qu'un sommet froid de nuage traduit la présence d'un nuage épais, généralement à l'origine de pluies convectives en surface. En Amazonie, Greco S. et al. (1990) ont mesuré que 82% du total des pluies durant la saison humide provenait de systèmes convectifs à méso-échelle. Le problème principal de cette méthode est soit de surestimer les nuages pluvio-gènes en intégrant les surfaces nuageuses froides et élevées des cirrus, soit d'occulter des pluies stratiformes apportées par des nuages d'altitude plus modeste.
- le rapport entre les températures maximales de brillance et le taux d'humidité de la surface consécutif à une averse. L'état du couvert végétal est donc assimilé à une réponse directe aux précipitations qui refroidissent alors la surface. Les problèmes de l'hétérogénéité des couverts et de la variabilité spatiale de l'émissivité restent contraignants dans ce type d'approche.

Dans cette gamme de longueur d'ondes, ce sont essentiellement les données fournies par les satellites géostationnaires (GOES, METEOSAT, GMS) qui sont utilisées : elles sont, en effet, acquises avec une grande fréquence (de 30 minutes à 3 heures) et avec une résolution spatiale variant de 3 à 5 kilomètres selon les capteurs.

Dans le domaine des micro-ondes, on a une relation directe entre les mesures d'absorption, émission ou diffusion du rayonnement et la taille et la concentration des hydrométéores (gouttelettes d'eau et cristaux de glaces composant les nuages). Les algorithmes micro-ondes sont nombreux, les méthodes par diffusion dans les gammes élevées de fréquences restant apparentées aux méthodes de l'infrarouge, alors que les méthodes par émission (basses fréquences) sont plus directement reliées aux phénomènes physiques (Miller et al., 2001). Dans ces longueurs d'ondes, ce sont les satellites DMSP (Defense Meteorological Satellite Programm) sur orbites basses, polaires et héliosynchrones qui fournissent les données SSM/I (Special Sensor Microwave

/ Imager). Les inconvénients de ces méthodes sont les problèmes d'émissivité rencontrés sur les surfaces continentales et leur faible échantillonnage spatio-temporel : les principaux jeux de données existants ne sont disponibles qu'au pas de temps mensuel et sur une grille de 1 à 2,5° (Ruprecht et Thomas, 1994 ; Ferraro et al., 1996). Avec la mission spatiale radar américano-japonaise TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, Simpson et al., 1988) une meilleure connaissance tridimensionnelle des systèmes pluvio-gènes a pu être obtenue mais, là aussi, sur une surface et un laps de temps réduits.

Pour concilier la bonne couverture spatiale et temporelle des données géostationnaires et la résolution fine et plus directement liée à la physique du phénomène, des méthodes combinées ont également été mises en œuvre depuis une dizaine d'années : MIRRA (Microwave/Infrared Rain Rate Algorithm) de Miller et al., 2001, RACC (Rain And Cloud Classification) de Jobard et Desbois, 1994, par exemple. Les résultats montrent une amélioration sensible des résultats, notamment sur les océans tropicaux mais les limites restent importantes sur les continents, pour les latitudes moyennes et dans des contextes topographiques à forts dénivelés (Bellerby et al., 2000 ; Xu et al., 1999). Finalement, en attendant la mise en place du système GPM (Global Precipitation Mission) basé sur l'exploitation simultanée de plusieurs satellites polaires micro-ondes complétés par un dispositif radar comparable à TRMM, ce sont encore essentiellement les données fournies par les satellites géostationnaires qui permettent d'obtenir la meilleure couverture spatio-temporelle des régions tropicales en matière de pluviométrie.

2.2. Méthodologie : utilisation des synthèses infrarouge GOES

Pour résoudre ce double problème des lacunes d'observations au sol et de la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations en zone tropicale, des estimations de précipitations à partir des images infrarouge fournies par les satellites géostationnaires sont réalisées depuis longtemps (Arkin et Janowiak, 1993 ; Guillot et al., 1994). Les tests et validations ont cependant surtout privilégié l'échelle continentale (l'Afrique, l'Amérique). Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser les données infrarouge GOES à pleine résolution (4km) pour essayer de proposer une cartographie des précipitations à plus grande échelle: le choix de ces données géostationnaires est justifié par notre souci de travailler à la résolution la plus fine possible (par rapport aux données de télédétection existantes) et du fait de leur meilleure couverture temporelle.

Les données ont été acquises au pas de temps tri-horaire et traitées à l'antenne IRD du CMS de Lannion à partir de septembre 1999 (www.satmos.meteo.fr). Elles proviennent du satellite géostationnaire américain GOES-8 (Geostationary Operational Environmental Satellite) positionné sur l'Equateur à 75° de longitude ouest. Les informations retenues sont celles du canal 4 (10,2-11,2 μm) à partir desquelles 2 jeux de données ont été réalisés (figure 5) :

- Un premier jeu de données retenant pour chaque journée la valeur maximale de la température observée pour chaque pixel : en synthétisant au pas de temps décadaire ou mensuel on élimine les effets atmosphériques et les nuages afin de ne conserver que l'émission en provenance du sol dont l'intensité est surtout fonction de la nature du couvert végétal et de son alimentation en eau (donc des pluies qu'il a reçu). Etudier les variations des températures maximales de brillance (TBmax) revient en fait à identifier les quantités d'eau précipitées en un point. Ce type de méthode a notamment été utilisé en Afrique dans le cadre du programme EPSAT qui a montré qu'un lien significatif existait entre ces TBmax et les précipitations.
- Un second jeu de données a été constitué en seuillant les mêmes images à partir de -40°C : ainsi, l'occurrence des nuages à sommet froid (de type convectifs et donc supposés apporter des précipitations) peut être également suivie au pas de temps mensuel. Cette méthode est adaptée des travaux précurseurs d'Arkin sur le Goes Precipitation Index, mais le seuil retenu ici est plus bas (-40°C au lieu de -38°C) d'après les résultats obtenus par Cadet et Guillot en 1991.

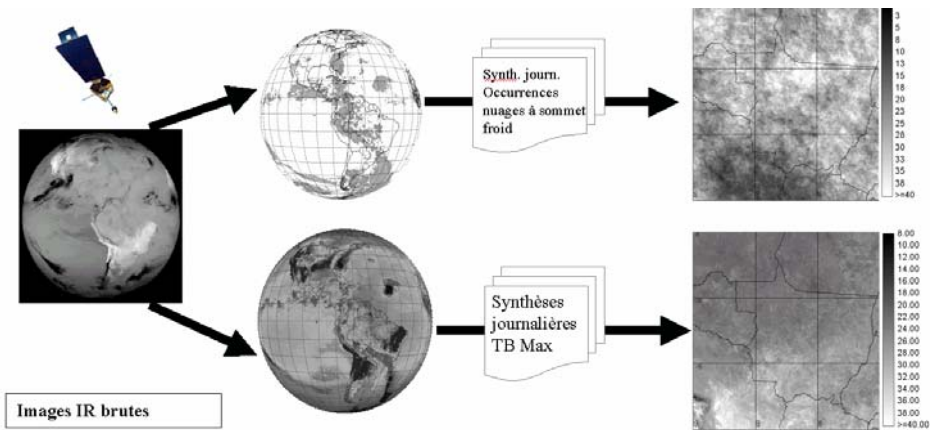


Figure 5 : Organigramme des traitements réalisés.

Nous présentons ici les résultats mensuels obtenus pour la période de septembre 1999 à août 2000 pour laquelle nous disposons également des données pluviométriques au sol pour environ 200 stations. L'espace étudié s'étend de 5°S à 20°S en latitude et de 50°W à 65°W en longitude, ce qui représente, en fonction de la résolution spatiale de GOES, des images de 412×412 pixels.

3. Résultats et discussion

3.1. Suivi de la saison des pluies 1999-2000

Les images des figures 6 et 7 permettent de suivre le développement des occurrences des nuages à sommet froid en relation avec celui des précipitations dans la région du Mato Grosso. Le mois de septembre est généralement considéré comme celui qui clôt la saison sèche avec l'arrivée des premières pluies. En 1999, on constate effectivement la présence d'un fort couvert nuageux convectif dans un bon tiers nord de l'Etat et les pluies 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. En fait, à partir de la fin du mois d'août le réchauffement continental permet le développement à l'ouest de systèmes convectifs tropicaux continentaux. En octobre 1999, une diagonale WNW-ESE (du Rondônia au centre sud du Mato Grosso) de plus fortes occurrences peut être mise en relation avec la dorsale topographique de la Chapada dos Parecis.

De décembre 1999 à mars 2000, les images montrent le plein développement des formations nuageuses précipitantes de la saison humide. Les systèmes convectifs amazoniens se développent dans un flux dominant de N, NW. Les images montrent la présence sur le Mato Grosso de systèmes convectifs locaux ou organisés, en relation avec la ZCAS (Zone de Convergence de l'Atlantique Sud), dont les interactions avec la ZCIT (Zone de Convergence Inter Tropicale) sont encore mal connus. 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 la masse d'air humide et instable (Nogués-Peagle & Mo, 1997; Liebmann et al., 1999). 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 qui, même situés au sud, renforcent l'instabilité et les pluies au Mato Grosso au cœur de la saison des pluies. On peut observer une certaine rémission des occurrences de nuages à sommet froid en janvier 2000 dans la moitié sud de l'Etat tandis qu'à l'ouest dans le Rondônia c'est en février que leur fréquence est la plus faible au cœur de la saison pluvieuse, ce qui peut venir illustrer le phénomène de *veranico* décrit plus haut.

Le retrait des systèmes pluvio-gènes est manifeste lors du mois d'avril 2000. Seul le nord de l'Etat, le Rondônia et les principaux reliefs (Serra de Cachimbo, Chapada dos Parecis) conservent une fréquence plus élevée d'occurrences de nuages à sommet froid. A partir de mai et surtout du mois de juin, on entre effectivement dans la saison sèche. Cette région passe alors sous la domination de l'Anticyclone Tropical Atlantique (ATA) qui affecte le Mato Grosso, progressant de l'ESE à l'WNW en donnant un type de temps stable de juin à sep-

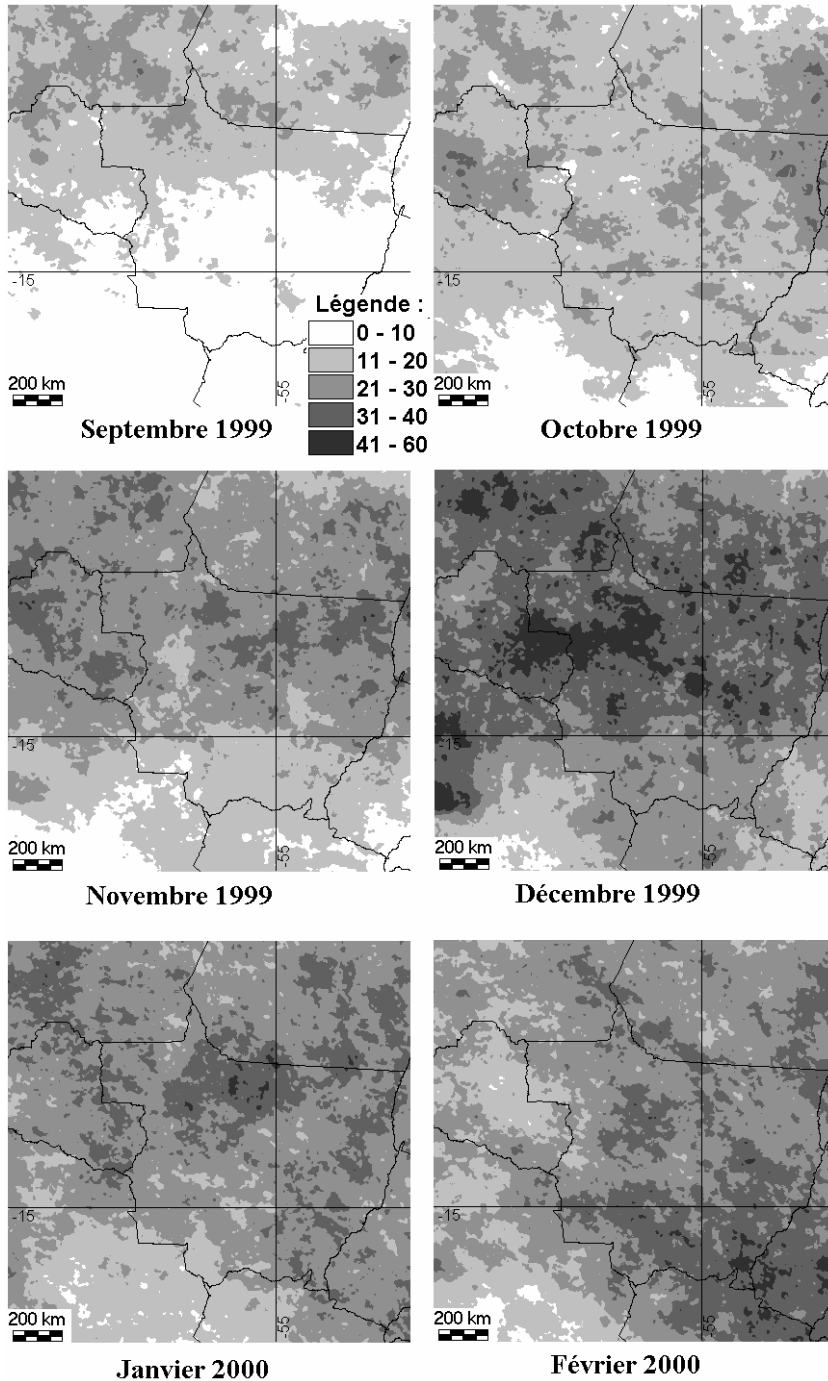


Figure 6 : Occurrences mensuelles des nuages à sommet froid (septembre 1999-février 2000).

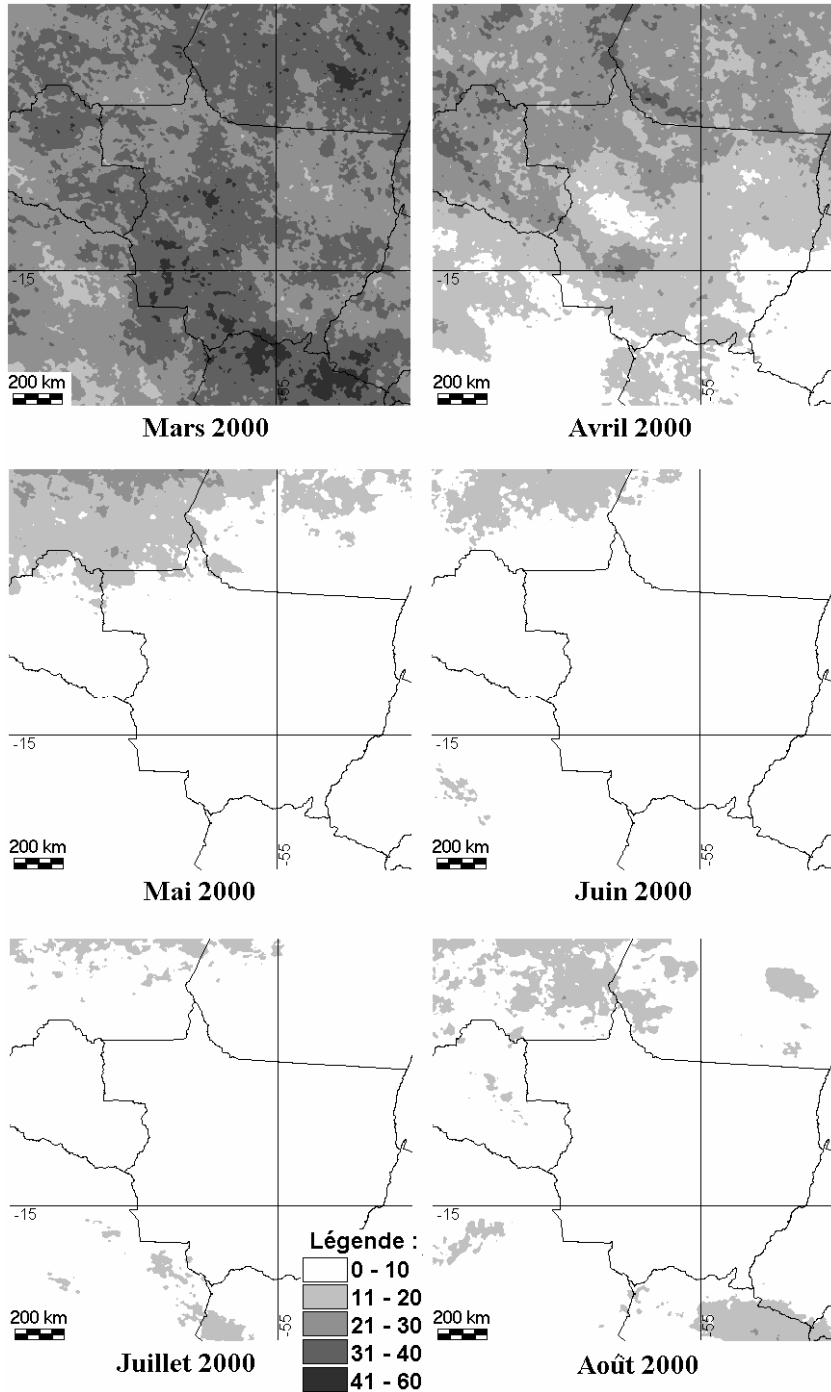


Figure 7 : Occurrences mensuelles des nuages à sommet froid (mars 2000 – août 2000).

tembre (masse d'air de type Tropical Atlantique Continentalisé). En juillet et surtout en août 2000, on peut cependant observer l'invasion par le sud-ouest des systèmes frontaux des latitudes moyennes : bien marquées sur le Mato Grosso do Sul, ces périodes pluvieuses et fraîches (*friagem*) de l'hiver austral apparaissent sur les synthèses satellitaires (ils apparaissent aussi sur la carte 3 où les pourcentages de pluies de Juin-Juillet-Aout ne sont pas nuls comme dans le SE de l'Amazonie par exemple) et confirment ici la transition vers les climats subtropicaux du Sud du Brésil où les invasions d'air polaire sont plus fréquentes (Planchon, 2003; Garreaud & Wallace 1998).

3.2. Corrélations entre précipitations, occurrences des nuages à sommet froid et TBmax

Le tableau 1 montre que les corrélations entre les pluies observées au sol et les données satellitaires sont bonnes au pas de temps mensuel, satisfaisantes pour l'année, médiocres pour les décades. On retrouve ici des résultats assez similaires à ceux obtenus sur l'Afrique lors du programme EPSAT mais une différence apparaît pour les résultats décennaires dont les chiffres sont faibles. Pour résoudre cette difficulté on a essayé diverses combinaisons de calculs de corrélations entre pluies décennaires et les TBmax : corrélation avec les TBmax de la décade précédente, suivante, moyennes glissantes sur 2 puis 3 décades, etc.... En effet, la réponse de la surface aux épisodes pluvieux ne traduit pas à chaque fois la même variation de TBmax ; le plus souvent, les précipitations ont un effet rapide sur l'état des couverts et donc des TBmax, mais, pour peu que l'épisode pluvieux survienne en fin de période, où si le couvert a une plus grande inertie thermique (notamment après une longue période arrosée), alors un décalage peut être observé entre la pluie et la variation de TBmax. Au contraire, une période de quelques jours sans pluie permet à l'eau de s'évaporer de la surface du sol et entraîne une augmentation des TBmax. La diversité des paysages et des couverts végétaux limite cependant cette méthode et aucune des combinaisons réalisées n'a pu améliorer significativement le premier résultat et la variance expliquée reste modeste (26%).

	Décades	Mois	Année
Occ	0.752	0.857	0.797
TBmax	-0.513	-0.647	-0.564
Occ+TBmax	---	0.865	0.798

Tableau 1 : Coefficients de corrélation (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouge GOES en fonction du pas de temps (Occ = occurrences mensuelles des nuages à sommet froid ; TBmax = Température maximale de brillance mensuelle)

Les coefficients de corrélation mensuels (tableau 2) calculés pour chacun des mois montrent bien également qu'un lien existe entre données satellitaires et précipitations au sol : dans tous les cas, l'augmentation de la fréquence des occurrences de nuages à sommet froid et des observations de températures de

surface plus basses (figure 8) sont synonymes d'une plus forte pluviométrie; en outre, les corrélations sont statistiquement significatives dans une marge d'erreur de 5% (à l'exception du mois de mars 2000 pour les TBmax). Mais au-delà de cette cohérence des signes des corrélations, le lien entre précipitations et données satellitaires n'est pas toujours très fort : les corrélations sont meilleures en début et en fin de saison pluvieuse, moins bonnes au cœur de la saison des pluies (à l'exception notable du mois de janvier 2000). De manière générale, les précipitations sont mieux corrélées aux occurrences de nuages à sommet froid (figure 9) qu'avec les températures maximales de surface. Si on utilise les deux paramètres satellitaires pour calculer une régression multiple et estimer les précipitations, les coefficients de corrélation sont bons ($r > 0.71$, soit 50% de variance expliquée) pour 4 mois sur 12 mais restent médiocres pour 4 mois également.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Obs.	197	197	188	171	190	170	175	179	184	206	207	206
Occ	0.60	0.42	0.41	0.58	0.67	0.26	0.23	0.64	0.81	0.85	0.67	0.61
TBmax	-0.48	-0.13	-0.42	-0.59	-0.60	-0.24	-0.15	-0.64	-0.60	-0.50	-0.65	-0.35
Oc+Tb	0.61	0.43	0.44	0.64	0.71	0.45	0.27	0.68	0.81	0.85	0.72	0.63

Tableau 2 : Coefficients de corrélation (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouge GOES ; en gras les coefficients supérieurs ou égaux à 0.63 (= 40% de variance expliquée).

Obs. = nombre de stations utilisées

Occ = occurrences mensuelles des nuages à sommet froid

TBmax = Température maximale de brillance mensuelle

Oc+Tb = régression multiple avec occurrences et TBmax

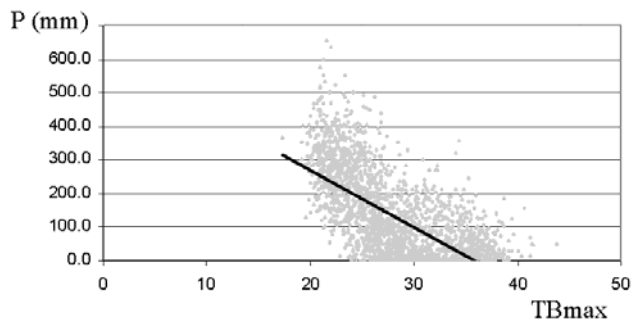


Figure 8 : Précipitations mensuelles et Températures maximales de brillance (septembre 1999 - août 2000)

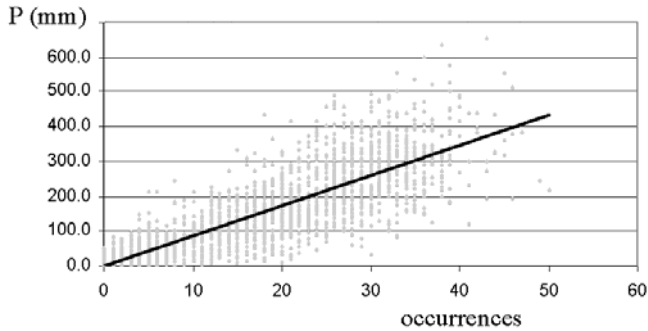


Figure 9 : Précipitations mensuelles et occurrences de nuages à sommet froid (septembre 1999 - août 2000)

On peut émettre 2 séries d'hypothèses pour expliquer ces résultats. Tout d'abord, les précipitations de début de saison des pluies peuvent être dues à des formations nuageuses moins épaisses (« frontales ») donnant des totaux pluviométriques significatifs mais sans lien avec les occurrences de nuages à sommet froid. Mais cette explication n'est pas satisfaisante pour les mois de février-mars : sans-doute qu'au cœur de la saison des pluies, l'activité convective généralisée a pour conséquence, cette fois, une dense couverture nuageuse d'altitude, un certain « bouillonnement » difficile à relier à l'intensité pluviométrique au sol dont la variabilité spatio-temporelle est à son comble.

3.4. Estimation des précipitations annuelles et lien avec la topographie

Pour tester la robustesse de cette méthode d'estimation des précipitations, nous avons cherché à la confronter avec une cartographie classique des pluies annuelles. L'objectif est de voir si les données satellitaires permettent notamment de mettre en évidence les conséquences de la topographie (figure 10) sur la répartition des précipitations (Bigot, 1997), comme cela a pu être suggéré pour les images des mois d'octobre 1999 et avril 2000. La mise en évidence de ce phénomène est souvent plus aisée au pas de temps annuel qu'au pas de temps mensuel (à ce pas de temps, et a fortiori au niveau décadaire, la distribution spatiale hétérogène des systèmes pluviogènes masque un effet orographique qui est statistique) et nous retiendrons donc l'ensemble de la période de septembre 1999 à août 2000.

Une première carte a donc été construite en reportant l'ensemble des valeurs pluviométriques annuelles et en les interpolant spatialement : la méthode d'interpolation retenue est classique, la valeur de chaque pixel étant fonction des 4 à 8 plus proches valeurs réellement observées et d'une pondération fonction de l'inverse de la distance au carré. Rappelons que l'objectif ici n'est pas de tester la méthode d'interpolation mais de confronter les données satellitaires à une carte simple. La figure 11 montre les effets « d'auroles » autour des stations, fréquents dans ce type de documents, ainsi que l'incertitude

des estimations dans les régions où aucune donnée au sol n'est disponible (est de la Bolivie ou ouest du Rondônia).

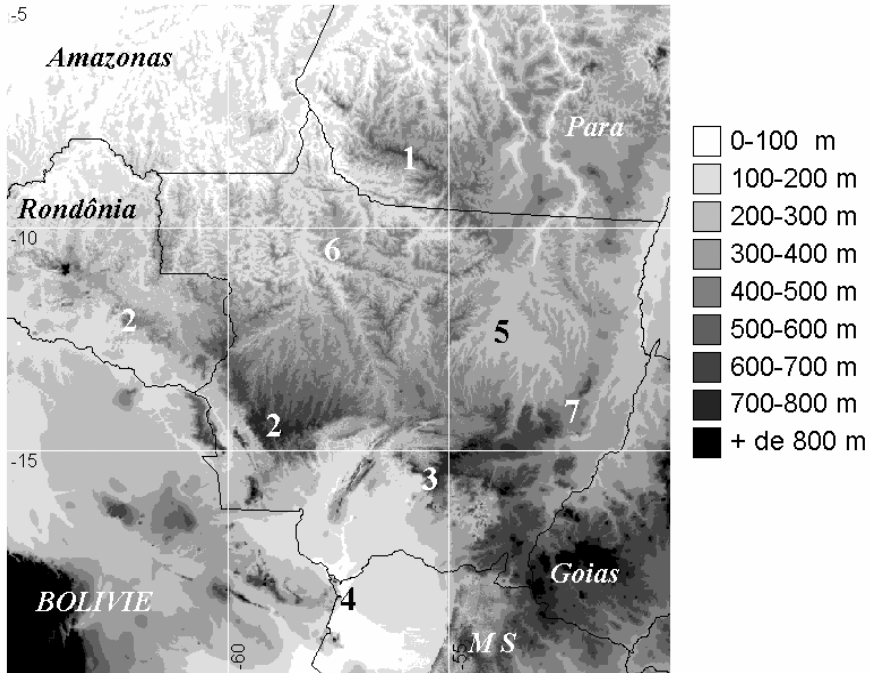


Figure 10 : Relief du Mato Grosso

1 : Serra do Cachimbo ; 2 : Chapada dos Parecis ; 3 : Chapada dos Guimaraes ;
 4 : Pantanal ; 5 : cuvette du Xingu ; 6 : Serra dos Apiacas ; 7 : Serra do Roncador ;
 MS: Mato Grosso do Sul

La figure 12 (légende et couleurs identiques à la précédente) correspond à l'estimation des précipitations par satellite en appliquant, pour chaque pixel et pour l'ensemble de l'année, la formule :

$$P \text{ (mm)} = 10.90 \times \text{Occ} - 0.34 \times \text{TBmax} - 436$$

Les deux cartes des images 11 et 12 présentent certaines similitudes mais aussi des différences significatives. Le gradient en latitude est ainsi globalement bien rendu dans les deux cas, de même que les secteurs de plus faible pluviométrie du sud-est, du Pantanal et de la Bolivie. L'imagerie satellitaire apporte cependant de nouvelles informations cohérentes avec la topographie de la région. La figure 10 permet notamment de retrouver les contours de certains massifs orographiques (Chapada dos Parecis, Dorsale du Rondônia, Serra do Cachimbo) dont la pluviométrie est plus élevée que les bas plateaux environnants. A l'opposé, la cuvette du Xingu apparaît comme un secteur moins arrosé. Certains noyaux de plus forte pluviométrie sont mis en évidence (Serra dos Apiacas) alors que l'absence de mesure au sol ne pouvait permettre de mêt-

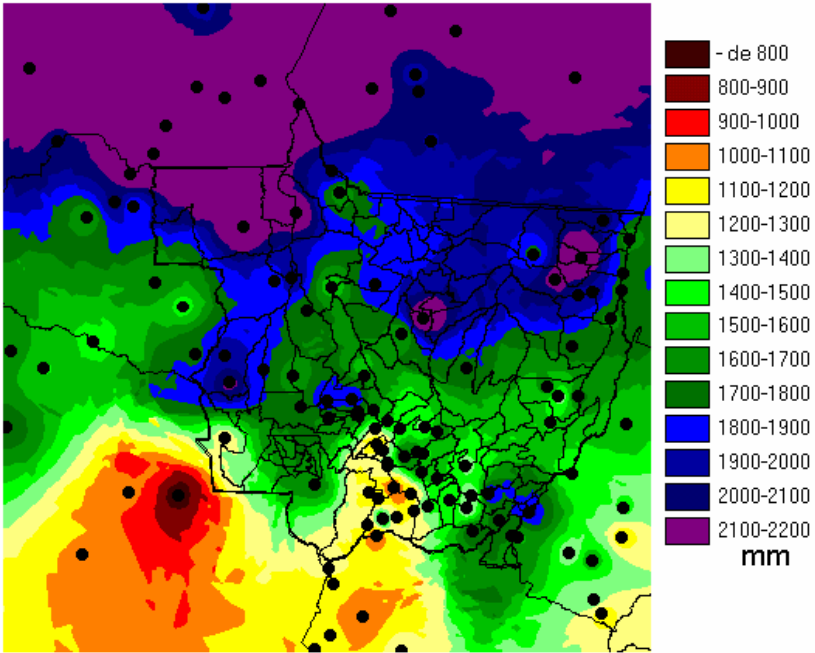


Figure 11 : Interpolation spatiale des précipitations ($1/d^2$) à partir des valeurs observées au sol pour l'année 1999-2000

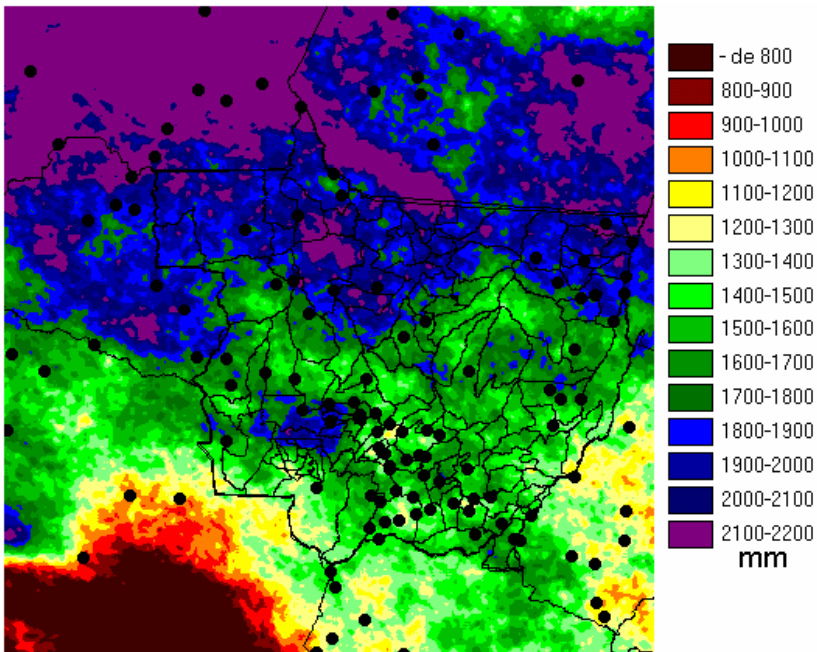


Figure 12 : Estimation des précipitations par données infrarouge GOES pour l'année 1999-2000

-me les suspecter. Vers le sud cependant (Pantanal, Goias, Bolivie), l'imagerie satellitaire semble montrer ses limites et le lien entre topographie et pluviométrie semble mieux rendu par la cartographie « classique » : il faut sans doute mettre cela en relation avec la plus forte proportion des pluies apportées par des systèmes nuageux stratiformes dans cette région, l'estimation par satellite focalisant sur les pluies convectives.

Conclusion

Au Mato Grosso, sur la période de septembre 1999 à août 2000, la confrontation entre les précipitations au sol et les données satellitaires infrarouge GOES montre que les pluies sont mieux corrélées aux occurrences des nuages à sommet froid qu'avec les températures maximales que ce soit au pas de temps mensuel comme pour l'ensemble de l'année. En effet, pour l'ensemble de l'année 1999-2000, en tenant compte de l'ensemble des observations pluviométriques et de toutes les données satellitaires mensuelles, on obtient une corrélation de 0.857 avec les occurrences de nuages à sommet froid et de -0.647 avec les températures de brillance. L'estimation des précipitations par satellite est donc bien adaptée dans cette région peu équipée en stations conventionnelles, mais doit privilégier la première méthode, la seconde ne contribuant guère à augmenter significativement la corrélation multiple ($r=0.865$).

Les résultats apparaissent cependant un peu moins bons (notamment au pas de temps décadaire, ce qui limite encore actuellement l'intérêt de l'utilisation directe de la méthode en agriculture) que ceux obtenus sur l'Afrique avec des méthodes équivalentes. On peut l'expliquer par la différence du pas d'archivage élémentaire (3 heures ici contre 30 minutes pour METEOSAT) et par le fait qu'en Amazonie méridionale la formation de systèmes convectifs est souvent d'échelle plus limitée et dépend essentiellement des conditions d'instabilité locale et du cycle diurne : ils sont donc soumis à une plus forte variabilité spatio-temporelle ce qui rend plus complexe l'estimation du volume précipité qu'ils engendrent (Durieux, 2002).

Quelle que soit l'occupation du sol, le paramètre « occurrences de nuages à sommet froid » apparaît comme un bon indicateur du volume précipité. Les bons résultats obtenus au pas de temps mensuels permettent de réaliser une cartographie des précipitations par satellite qui fait clairement ressortir l'influence de la topographie quand on intègre les totaux sur l'ensemble de l'année. En revanche, la corrélation plus faible obtenue avec les températures de surface doit être mise en relation avec l'hétérogénéité des types d'occupation du sol (marécages au sud, savanes au centre, forêts et front pionnier avec défrichements intenses au nord) : les synthèses mensuelles reflètent donc davantage la nature des paysages et de la végétation que la manière dont réagit le couvert à la pluviométrie. Il faudrait donc poursuivre ce travail, d'une part en

séparant les types de couverts et, d'autre part, en utilisant d'autres indicateurs satellitaires sensibles à la manière dont répond la végétation à la pluie comme l'indice NDVI issu des synthèses des données NOAA ou SPOT-Végétation.

Bibliographie

- ARKIN P.A., JANOWIAK J.E., 1993 : Tropical and Subtropical precipitation, in *Atlas of satellite observations related to global change* Ed.by R.J.Gurney, J.L.Foster, C.L.Parkinson, Cambridge University Press, pp. 165-180.
- BELLERBY T., TODD M., KNIVETON D., KIDD C., 2000 : Rainfall estimation from a combination of TRMM precipitation radar and GOES multispectral satellite imagery through the use of an artificial neural network, *Journal of applied Meteorology*, vol. 39; pp. 2115-2128.
- BIGOT S., 1997 : *Les précipitations et la convection profonde en Afrique centrale: cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation*; Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Bourgogne, Dijon, 283 pages.
- CADET D., GUILLOT B., 1991: *EPSAT: Estimation des Pluies par Satellite*; ORSTOM Editeur, 63 pages.
- DANTAS O., GERALDINI M., 1997 : Veranico: estudos preliminares na região de Dourados, *Boletim Climatológico*, UNESP-2-3, pp. 142-145.
- DUBREUIL V. (dir.), 2002 : *Environnement et télédétection au Brésil* ; Presses Universitaires de Rennes, 200 pages.
- DUBREUIL V., LECAMUS A., DAGORNE D., MAITELLI G.T., 2000 : Apport des satellites géostationnaires GOES pour l'étude du climat du Mato Grosso, Brésil, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, Volume 13, pp .401-409.
- 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 pages.
- FERRARO R.R., WENG F., GRODY N.C., BASIST A., 1996 : An eight-year (1987-1994) time series of rainfall, clouds, water vapor, snow cover, and sea ice derived from SSM/I measurements, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, n°5, pp.891-905
- GARREAUD R. D. AND J. M. WALLACE, 1998 : Summertime incursions of mid-latitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review* 126, pp. 2713-2733.
- GRECO S. et al., 1990 : Rainfall and surface kinematic conditions over central Amazonia during ABLE 2B, *Journal of Geophysical Research*, 95, pp. 17001-17014.
- GUILLOT B., LAHUEC J.P., DAGORNE D., 1994 : *Satellite et surveillance du climat. Atlas de veille climatique : 1986-1994*, ORSTOM-Météo-France, Paris, 91 pages.

- HERMAN A., KUMAR V.B., ARKIN P.A., KOUSKY, 1997 : Objectively determined 10-days African rainfall estimates created for famines early warning systems ; *International Journal of Remote Sensing*, vol.18, pp. 2047-2060.
- JOBARD I., DESBOIS M., 1994 : Combination of satellite microwave and infrared measurements for rainfall estimation, in Desbois M. et Désalmand F. *Global precipitations and climate change*, NATO-ASI, Springer-Verlag, pp. 265-278.
- LIEBMANN B., G. KILADIS, J. MARENGO, T. AMBRIZZI AND J. GLICK. 1999 : Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone, *Journal of Climate*, 12, pp. 1877-1891.
- MILLER S.W., ARKIN P.A., JOYCE R., 2001 : A combined microwave/infrared rain rate algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 3285-3307.
- MONTEIRO C.A. de F., 1951 : Notas para o estudo do clima do centro-oeste Brasileiro, *Revista Brasileira de Geografia*, XIII-1, pp. 1-46.
- NIMER E., 1989 : *Climatologia do Brasil*, IBGE, Rio de Janeiro, 421 pages.
- NOGUÉS-PEAGLE J. and K. C. MO, 1997 : Alternating wet and dry conditions over South America in summer, *Monthly Weather Review*, 125, pp. 279-291.
- PLANCHON O., 2003 : Transitions entre climats tropicaux et tempérés en Amérique du Sud : essai de régionalisation climatique, *Cahiers d'Outre-Mer*, 56 (223), pp. 259-280.
- POISSONNIER P., 1991 : Localisation des formations nuageuses convectives sur l'Amazonie par télédétection satellitaire (1975-1979) , *Veille Climatique Satellitaire*, n°39, pp. 32-46.
- RADAMBRASIL Projeto, 1983 : *Mapa Fitoecologico a escala 1:1 000 000*, Folha V-20 (Juruena) and Folha V-26 (Cuiaba).
- RONCHAIL J., COCHONNEAU G., MOLINIER M., GUYOT J.L., GORETTI DE MIRANDA CHAVES A., GUIMARÃES 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, pp. 1663-1686.
- 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, Dijon, 199 pages.
- RUPRECHT E., THOMAS C., 1994 : Use of microwave radiometry to estimate precipitations: physical basis and intercomparison of algorithms ; in Desbois M. et Désalmand F., *Global precipitations and climate change*, NATO-ASI, Springer-Verlag, pp. 249-264.
- SETTE D.M., 2000 : *O holorrítmo e as interações tropico-extratropico na gênese do clima e as paisagens do Mato Grosso*, thèse de Doctorat de l'Université de Sao Paulo, 375 pages + annexes.

- SIMPSON J., ADLER R.F., NORTH G.R., 1988 : A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite, *Bulletin of the American meteorological Society*, vol.68, pp. 278-295.
- THORNE V., COAKELEY P., GRIMES D., DUGDALE G., 2001 : Comparison of TAMSAT and CPC rainfall estimates with raingauges for southern Africa, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 1951-1974.
- WILKERSON J.C. (Ed.) 1988 : *Report of the international workshop on the validation of satellite precipitation measurements for the global precipitation climatology project (GPCP)*, WNO/TF-N°203, WCRP-1, Genève.
- XIE P., ARKIN P.A., 1995 : An intercomparison of gauge observations and satellite estimates of monthly precipitation, *Journal of Applied Meteorology*, vol.34, pp. 1143-1160.
- XU L., GAO X., SOROOSHIAN S., ARKIN P.A., IMAM B., 1999 : A microwave infrared threshold technique to improve the GOES Precipitation Index, *Journal of Applied Meteorology*, vol.38, pp. 569-579.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier Dominique Dagherne de l'IRD (Lannion), Aline Lecamus, Virginie Jumeau et Pascal Gouery (COSTEL, Rennes 2) pour l'acquisition et le pré-traitement des images ainsi que Andreлина de Santos et Waldemar Guimaraes (ANA-SIH, Superintendencia de Informações Hidrológicas) pour la fourniture des données climatologiques.