



HAL
open science

Climats et pionniers du Mato Grosso

Vincent Dubreuil

► **To cite this version:**

Vincent Dubreuil. Climats et pionniers du Mato Grosso. Géographie. Université Rennes 2, 2005.
tel-00319198

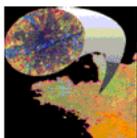
HAL Id: tel-00319198

<https://theses.hal.science/tel-00319198>

Submitted on 5 Sep 2008

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

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

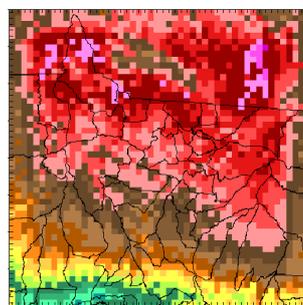
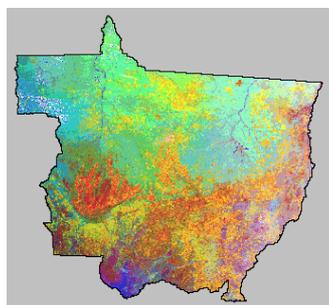


H.D.R.

Dossier pour l'habilitation à diriger des recherches

Climats et pionniers du Mato Grosso :

apport des données satellitaires et de la modélisation pour le suivi des interactions nature/société dans une région de front pionnier de l'Amazonie brésilienne



Volume 3 : Synthèse des positions de recherche

Vincent DUBREUIL

Laboratoire COSTEL (Climat et Occupation du Sol par Télédétection)

UMR 6554 – CNRS – LETG (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique)

Soutenue à Rennes le 12 décembre 2005 devant le jury :

Pierre CARREGA : Professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis (*rapporteur*)

Wilfried ENDLICHER : Professeur à l'Université Humboldt, Berlin, Allemagne (*examineur*)

Claude KERGOMARD : Professeur à l'Ecole Normale Supérieure, Paris (*examineur*)

Jean Pierre MARCHAND : Professeur à l'Université Rennes 2 (*directeur*)

Hervé REGNAULD : Professeur à l'Université Rennes 2 (*examineur*)

Hervé THERY : Directeur de recherche CNRS et Professeur à l'Univ. São Paulo, Brésil (*rapporteur*)

Sommaire du Volume 3 : texte de synthèse

Climats et pionniers du Mato Grosso :
apport des données satellitaires et de la modélisation pour le suivi des interactions nature/société dans une région de front pionnier de l'Amazonie brésilienne

Introduction	3
1- 1e front pionnier du Mato Grosso : apport de la télédétection pour le suivi d'une région soumise à une forte pression anthropique	9
1.1 - De la forêt à la déforestation	12
1.2 – Des projets de colonisation aux pâturages	43
1.3 - Vers le soja : exemple de la Chapada dos Parecis	58
1.4 - La « forêt urbanisée »	68
2- Le climat du Mato Grosso : de la nécessité du recours à la télédétection	81
2.1 - Agriculture et climat au Mato Grosso : une demande croissante !	84
2.2 - Le Mato Grosso : une région mal connue sur le plan climatique	87
2.3 - Climat et satellites : la diversité des méthodes et données satellitaires disponibles pour l'étude du climat	102
2.4 - Utilisation des synthèses infrarouge GOES pour le suivi des pluies de 1999 à 2001	109
2.5 - Apport des synthèses NDVI SPOT-Végétation pour le suivi des interactions climat-agriculture	123
3- De l'observation à la modélisation : l'impact du front pionnier sur le climat	135
3.1 - Modéliser la dynamique du front pionnier :	138
3.2 - Mesures des conséquences climatiques de l'urbanisation dans le Nord du Mato Grosso	155
3.3 - Déforestation et climat : théories et mesures à l'échelle locale dans la région d'Alta Floresta	170
3.4 - Modélisation des conséquences climatiques de la déforestation à l'échelle régionale	179
Conclusion générale	191
Bibliographie	197
Sources utilisées	216
Sigles et Glossaire	217
Liste des figures	219
Liste des tableaux	223
Liste des photos	224
Table des matières	226

Introduction

« La nature est tour à tour la mère et la fille de l'homme » L.F.Ramond (1755-1827) cité par C.P.Péguy, 2001

Les transformations les plus profondes qui ont touché la surface de la Terre dans la deuxième moitié du XXe siècle ont été d'une part l'extension des surfaces urbanisées et d'autre part la conquête de nouvelles terres agricoles aux dépens des forêts tropicales (Lepers et al., 2005). Cette dernière a rapidement attiré l'attention des géographes car il s'agit d'un phénomène dont l'ampleur dépasse les grandes phases de défrichements et de mise en valeur historiquement connues (conquête des Grandes Prairies américaines, des steppes russes, défrichements de l'Occident Médiéval,...). Les conséquences de cette transformation sont souvent, à juste titre, présentées comme désastreuses sur le plan social (pauvreté des colons, question indienne) et écologique (perte de la biodiversité et érosion des sols). Cette évolution a aussi posé le problème des conséquences climatiques d'un tel bouleversement des paysages car elle contribue à transformer radicalement les processus d'échanges à l'interface biosphère - atmosphère (Shukla et al., 1990): augmentation de l'albédo, diminution du flux d'évapotranspiration, augmentation du flux de chaleur sensible, émission - rejet de carbone dans l'atmosphère (Houghton, 1999)...

Ainsi, le suivi de la déforestation dans la zone tropicale est devenu un enjeu scientifique majeur pour préciser l'ampleur des modifications climatiques prévisibles dans le cadre du "Global Change" (Laurence, 2000). L'Amazonie, de loin la plus importante des forêts tropicales avec ses 6 millions de kilomètres carrés, a donc focalisé un nombre considérable de travaux, notamment dans sa partie brésilienne qui représente près des 4/5e du total. Dans cette région, l'essentiel de ces transformations se sont produites au cours des 30 dernières années c'est-à-dire dans une période où les données de télédétection spatiale sont devenues de plus en plus opératoires. De grands programmes nationaux ou internationaux ont permis un inventaire des ressources disponibles (RadamBrasil, 1982) mais aussi le suivi de l'occupation des sols. A l'échelle de l'Amazonie, l'étude systématique des données Landsat représente un travail colossal (INPE, 1996). Ce sont donc souvent des données à plus faible résolution spatiale mais avec une meilleure répétitivité temporelle qui ont été utilisées comme celles fournies par les satellites NOAA-AVHRR (Malingreau et al., 1989).

Formant la plus grande partie de l'actuel arc de déforestation, le nord de l'Etat du Mato Grosso a connu depuis les années 1970 un mouvement de conquête agricole (Bret, 1977) qui a entraîné la conversion de vastes surfaces de forêt tropicale en terres agricoles, principalement dévolues à l'élevage ou à la culture mécanisée du soja (Droulers, 1995 ; Abaladejo & Tulet, 1996). Parallèlement, le passage des questions environnementales au premier plan des préoccupations internationales a amené depuis le milieu des années 1980 le financement de programmes internationaux de grande ampleur pour tenter de maîtriser le rythme de la destruction et permettre la préservation des zones les plus intéressantes sur le plan écologique. Ces deux dynamiques, très actives à l'heure actuelle, ont de plus en plus de mal à coexister, chaque forme de gestion de l'espace revendiquant aujourd'hui des espaces dévolus à l'autre.

Ceci pose la question du « développement durable » (Droulers, 2004 ; Carrega et al., 2004), notion qui a émergé des réflexions internationales sur le développement économique et l'aide au Tiers-Monde (rapport Bruntland) ainsi que des rapports des sociétés avec leur environnement notamment climatique. Par la forme prédatrice (Eglin & Thery, 1982) qu'a pris son développement dans les années 1970 et 1980 et du fait de l'indignation grandissante face à la déforestation, l'Amazonie s'est trouvée en première ligne (Bursztyn & Bartholo, 1999 ; Bursztyn et al., 2003). En effet, le front pionnier amazonien, loin d'appartenir au passé, est encore très actif. Les images satellites montrent que les superficies forestières converties en zones agricoles ont oscillé entre 15 000 et 25 000 kilomètres carrés par an tout au long de la décennie 1990 et l'essentiel du défrichement se concentre toujours au Rondônia, Para et Mato Grosso.

L'Etat du Mato Grosso se trouve donc 'à la croisée de deux chemins' sur le plan des rapports entre la société et la nature. D'un côté, comme le prévoit le projet fédéral "Avança Brasil", continuer la colonisation (privée ou publique) des terres reviendrait à créer de toutes pièces une région agricole, probablement puissante, mais au prix à la fois de la destruction d'écosystèmes extrêmement riches, de la transformation radicale du climat et des sols et de la disparition dans ces régions de l'identité amazonienne. De l'autre, essayer de contenir la poussée des agriculteurs, petits et grands, dans les zones déjà défrichées et geler le reste du territoire pour le protéger risque d'entraîner un déphasage de développement très important entre les régions, puisque les alternatives dites "durables" (Albaladejo, 2001 ; Théry, 2000) sont encore mal définies sur le plan de la rentabilité économique et du marché potentiel, sans parler de leur contenu conceptuel souvent flou et polysémique.

L'hypothèse de recherche principale de ce travail consiste donc à considérer le Mato Grosso comme une région laboratoire pour l'étude des interactions climat/sociétés actuelles et futures en Amazonie brésilienne et, au-delà, pour les fronts pionniers dans les régions tropicales.

Les questions de recherches privilégient l'approche spatiale des interactions entre nature et société en mettant l'accent sur l'étude des processus dynamiques naturels et anthropiques qui contribuent à définir les milieux et les paysages. Dans ce cadre, les données acquises par télédétection à toutes les échelles spatiales constituent une source d'information toujours privilégiée et dont l'utilisation systématique doit permettre de définir des trajectoires d'occupation du sol sur des séquences temporelles de plus en plus longues. Le projet de recherche s'inscrit donc globalement dans l'axe 1 défini au niveau de l'UMR 6554 «Analyse des processus dynamiques à l'interface Nature/Société et fonctionnement des systèmes complexes». Ce thème traite spécifiquement de la manière dont évolue le système géographique soumis à des contraintes (le terme de contrainte physique désigne une interaction entre le système physique, la société et le territoire ; Charre, 1981 ; Marchand, 1981, 1985) multiples pour produire des modes d'utilisation de l'espace et des paysages dans des contextes socio-économiques variés. Il ne s'agit plus seulement de faire une description exhaustive à un instant « t » mais de replacer l'état actuel dans une perspective temporelle et de montrer comment la situation observée s'intègre dans une dynamique (extrêmement rapide en l'occurrence) : le recours à la modélisation devient alors nécessaire non seulement pour proposer un schéma de compréhension global mais aussi pour définir des scénarii d'évolutions probables des trajectoires observées.

Plus spécifiquement, il s'agit de développer l'étude des interactions entre les processus climatiques et les activités humaines dans des régions soumises à une forte pression anthropique en privilégiant les observations satellitaires et la modélisation.

Dès lors on peut schématiser la démarche conceptuelle et méthodologique en inscrivant les travaux de recherches prévus dans un plan (figure 0.1) défini par :

- un axe thématique où les thèmes traités (climat, déforestation, colonisation agricole) sont liés par un lien de causalité réciproque : la colonisation agricole « produit » la déforestation ce qui modifie le climat. En sens inverse, la variabilité climatique influe sur les activités humaines.
- un axe méthodologique qui part d'une observation et de collectes de données in-situ jusqu'à la modélisation des processus observés en passant par le problème de l'interpolation des données (mesurées ou acquises par différents capteurs).

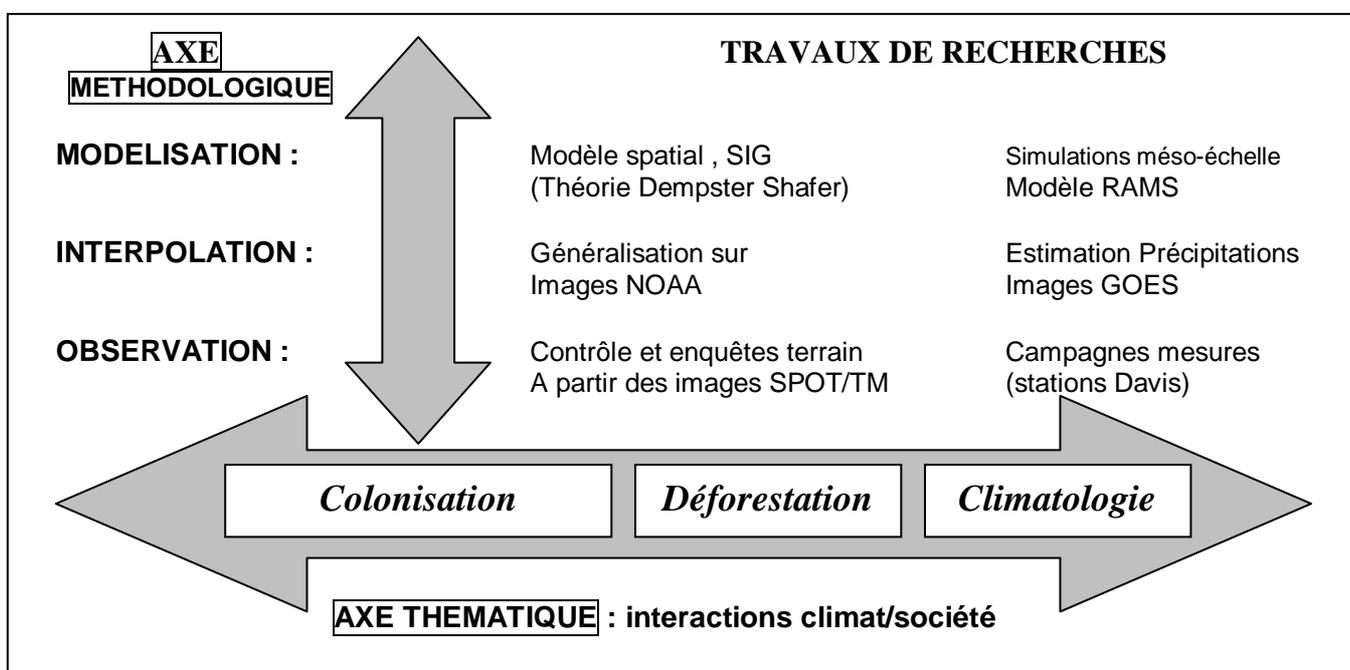


Figure 0.1 : Les thèmes et les méthodes du projet de recherche

En continuité avec les recherches menées depuis la thèse, mes problématiques sont donc toujours orientées vers l'étude des interactions entre climat et l'occupation du sol, mais elles sont désormais davantage tournées vers l'analyse et la modélisation de systèmes complexes et la mise en relation de leur évolution avec les activités anthropiques : **la télédétection, si elle rend compte des évolutions des surfaces homogènes et des structures spatiales fines n'est réellement exploitée que si elle sert de point d'appui à une modélisation à différentes échelles. Outil d'extrapolation spatiale, elle vient aussi renforcer notre compréhension des processus physiques, naturels et socio-économiques qui organisent les territoires.** C'est dans cette optique que se conçoit ce projet de recherche.

Nous proposons donc une approche par emboîtement d'échelles qui s'inspire de la démarche retenue dans le cadre du programme LBA (Large scale Biosphere-Atmosphere interactions in Amazonia) et des opérations en cours de développement dans le programme LUCC (Land-Use / Land-Cover Change) auquel participe le laboratoire COSTEL :

- Au niveau local, on peut établir des bilans précis des mutations en cours sur les plans économique, écologique et social. L'interprétation d'images satellites permet de définir des formes et configurations spatiales, de suivre les évolutions (déforestation, conquête agricole ou urbanisation) et de quantifier leur vitesse. On privilégie dans ce cas les capteurs Landsat-TM, ETM+ et SPOT-HRV notamment à travers des combinaisons multitemporelles qui permettent de déceler rapidement les changements dans l'occupation des sols. Enfin, des campagnes de mesures météorologiques sur le terrain permettent de quantifier les impacts locaux des évolutions constatées.
- Au niveau régional, on peut évaluer les dynamiques, notamment grâce aux outils cartographiques et aux systèmes d'information géographique. La généralisation des données locales à des espaces plus vastes (comme les Etats) peut être réalisée par l'utilisation d'images satellites à plus basse résolution spatiale, comme les données NOAA-AVHRR ou celles fournies par l'instrument Végétation de SPOT-4. En outre, notre objectif est d'étudier les conséquences climatiques à une échelle intermédiaire par rapport aux deux niveaux scalaires retenus généralement (le local et le global) c'est à dire à l'échelle régionale (meso-scale). Peu de travaux existent en effet dans cette gamme pour une raison assez simple : pour juger d'un éventuel effet à cette échelle il faudrait pouvoir disposer de longues séries de mesures (avant et après la déforestation), séries qui n'existent pas puisque les mesures ont la plupart du temps commencé lors de la mise en valeur agricole... D'où l'intérêt du recours à la modélisation numérique : nous utiliserons le modèle RAMS de l'Université du Colorado, utilisé en France notamment par le Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université de Clermont-Ferrand.

Les objectifs de recherche développés dans ce projet sont de :

- Quantifier au moyen des données satellitaires à diverses échelles et des entretiens de terrain l'ampleur et la nature des transformations d'occupation du sol et du paysage en identifiant les logiques de ces nouvelles dynamiques spatiales dans cette partie de l'Amazonie.
- Quantifier et cartographier à méso-échelle par télédétection les conditions climatiques actuelles (précipitations notamment) dans une région où la mise en valeur agricole a été réalisée sans véritable connaissance climatique préalable.
- Modéliser les dynamiques et les interactions nature/société dans cette région de manière à proposer aux décideurs locaux et nationaux une base de réflexion pour la détermination des politiques les plus adaptées à la région (de Mello, 2002). Il s'agit notamment de mesurer l'impact environnemental et notamment climatique des changements des états de surface (principalement le remplacement des surfaces en forêt par des pâturages).

Ce projet, abordé dans les pages qui suivent, n'est pas seulement celui d'un individu. La recherche, nous y reviendrons, est impérieusement collective et particulièrement dans des milieux difficiles et éloignés. Elle l'est surtout du fait de la complexité des processus en œuvre. Le travail est donc nécessairement réalisé en équipe, le chercheur essayant de mener ses travaux et d'asseoir sa réflexion en s'entourant de nombreuses personnes. Il est de coutume de remercier toutes ces personnes dans un avant-propos : nous ne le ferons pas car nous pensons que ces personnes font partie intégrante de la recherche et donc qu'elles doivent trouver leur place dans le texte de la recherche et pas « à part ». Tout d'abord, la réflexion est stimulée, encouragée par des collègues ayant une certaine expérience : ce sont pour nous Jean Mounier (pour la climatologie et les satellites), Robert Bariou (pour la télédétection et le Brésil) et Jean Pierre Marchand (pour les interactions climat/société) qui ont été les rencontres décisives : sans eux, ces pages n'auraient jamais été écrites. Ensuite, ce sont les collègues de l'équipe COSTEL, ceux avec qui sont partagés les travaux au quotidien sur le terrain ou au laboratoire : le tableau suivant, reprenant les axes du projet tels que présentés à la page précédente, tente de les resituer dans le contexte de nos recherches matogrossenses: ils ne sont pas cités par complaisance mais parcequ'ils joué un rôle dans notre parcours de chercheur dans le cadre de ce projet. Ce même tableau peut être reproduit en indiquant le cercle géographique plus large des collaborateurs extérieurs : brésiliens, bien sur, et tous ceux qui ont participé et participent encore à cette aventure. Enfin, c'est le sens de « l'habilitation à diriger », le chercheur forme, « encadre » des étudiants dans leurs « premiers pas » vers la recherche. Beaucoup de données sur le terrain ne pourraient pas être collectées sans eux. Ceux ayant participé aux recherches sur le Mato Grosso apparaissent donc également dans le tableau ci-dessous ; une mention particulière pour Vincent Nédélec, présent dans 5 des 8 missions de terrain réalisées jusqu'ici (d'où le sigle NDVi², pour Nédélec-Dubreuil-Vincent & Vincent, sur plusieurs photos et figures communes).



Figure 0.2 : Une recherche collective : les partenaires au sein du laboratoire COSTEL. Il faut ajouter à ce tableau les collègues ayant participé à des missions communes (voir 1^e partie) et l'aide méthodologique récurrente apportée par Pascal Gouery (informatique), Isabelle Ganzetti (Cartographie), Delphine Pommerais (documentation) et Claire Lejeune (documentaires vidéo). En rouge, les chercheurs « statutaires », en vert les étudiants de maîtrise, en bleu ceux de DEA/DESS/Master Recherche, en violet les doctorants.

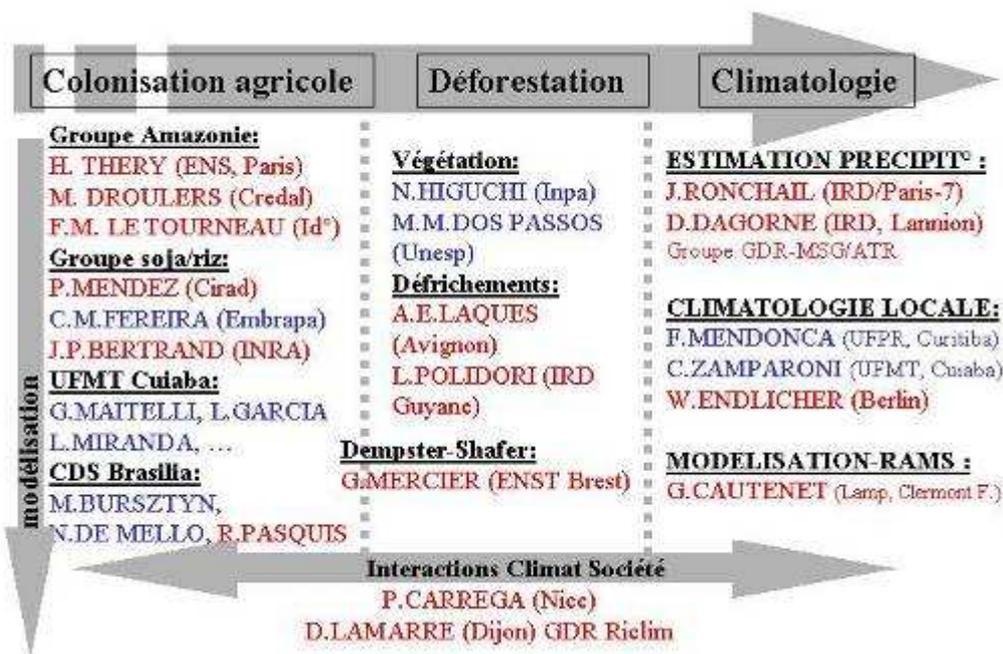


Figure 0.3 : Une recherche collective : les partenaires à l'extérieur du laboratoire COSTEL. Seuls sont indiqués ici les collègues ayant participé concrètement (publications missions communes, séminaires, réponses à appels d'offre ou programmes communs) à ce projet.

La poursuite de ces recherches est aussi de leur ressort.

1^e partie

LE FRONT PIONNIER DU MATO GROSSO :

APPORT DE LA TELEDETECTION POUR LE SUIVI D'UNE REGION SOUMISE A UNE FORTE PRESSION ANTHROPIQUE



Photo 1.1 : Parcelle en cours de défrichage à l'est d'Itanhanga
(V.Dubreuil, avril 2005)

Introduction :

« Quel rôle peut jouer la géographie, science horizontale par excellence, dans l'analyse d'un monde dont l'histoire s'essaye à reconstituer de son côté une mémoire verticale ? » (Péguy, 2001)

Les régions pionnières de l'Amazonie méridionale ont connu un formidable essor des productions agricoles depuis les années 1970. Cette dynamique spatiale s'est accompagnée d'une forte migration de colons en provenance du sud du Brésil (la population de l'Amazonie brésilienne passe de 2 à 20 millions de personnes de 1900 à 2000) et de la mise en place d'infrastructures nécessaires au développement d'une économie de plus en plus tournée vers les marchés internationaux (Krug, 2001). Les vagues successives de colonisation agricole, soutenues par les programmes gouvernementaux, ainsi que des phases plus ou moins violentes de conflits liés à la terre, ont généré une mosaïque de situations foncières et des structures de productions. Cette dynamique pionnière a aussi contribué à bouleverser profondément les paysages, les forêts et les savanes étant progressivement remplacées par des paysages agricoles ou urbains (Moran, 1993 ; Lena, 1999 ; Pasquis, 1999 ; Fearnside, 2005). L'ampleur de la déforestation tropicale (en surface plus de 2% par an en Amérique Centrale, moins de 1% en Afrique) a des conséquences dramatiques d'un point de vue biologique : rassemblant la moitié des espèces vivantes sur 7% de la superficie de la Terre, les forêts tropicales connaissent, chaque année la disparition de 4 à 6000 espèces vivantes. Avec 4 millions de kilomètres carrés (soit les deux-tiers du total de l'hylea), la forêt amazonienne brésilienne représente la moitié des forêts tropicales du globe (40% de celles restant en 2001) et 10% de la production nette primaire de la planète. Dans cette région, chaque hectare déboisé renvoie l'équivalent de 200 mètres cubes de carbone dans l'atmosphère (Laurence et al., 2001). Rappelons cependant que l'Amazonie Brésilienne « légale » couvre 5 millions de km² (incluant les savanes) et que sa définition est purement administrative. Dans l'Etat du Mato Grosso, entièrement compris dans l'Amazonie Légale, seule la moitié nord relève de la forêt et du système hydrographique amazonien. C'est dans cette région, aux paysages au demeurant très divers, que se concentrent nos recherches : il s'agit en effet d'une des régions les plus actives de l'arc de déforestation, celle dont l'essor agricole a été le plus spectaculaire depuis une trentaine d'années.

Cette évolution radicale a coïncidé, sur le plan temporel, au développement des plateformes d'observation satellitaire : les données acquises par télédétection se sont rapidement révélées très utiles pour effectuer un suivi de ces régions en transformation rapide (Cardille & Foley, 2003). La diversité des capteurs permet, depuis plus de 20 ans, de suivre les changements d'occupation du sol à une échelle régionale et continentale (images NOAA-AVHRR ; Townshend et al., 1985, 1991) mais aussi à une échelle locale (LANDSAT, SPOT) pour suivre des changements liés aux activités agricoles ou à l'urbanisation. Nous essaierons de montrer comment la démarche géographique, combinant les enquêtes et observations de terrain avec le recours aux images satellites, permet de décrire et interpréter l'évolution de la déforestation, les phases successives de la colonisation agricole et de comprendre la logique d'organisation spatiale actuelle des types de paysages en milieu rural puis en milieu urbain.

1.1 - De la forêt à la déforestation

111- De la « frontier » au front pionnier

L'incorporation de nouvelles terres à l'œcoumène est un processus récurrent dans l'histoire de l'humanité. La colonisation agricole en Amazonie brésilienne fait partie de ces mouvements radicaux de transformation de la surface de la planète par les sociétés. Cette évolution n'est pas sans rappeler celle qu'a connu le sud du Brésil à partir de la fin du XIXe siècle ou les Etats Unis quelques décennies auparavant. Très tôt les géographes ont donc été amenés à décrire et analyser ces phénomènes : ainsi, les concepts de « frontier » aux Etats-Unis puis de « frange pionnière » et finalement de « front pionnier » ont progressivement été forgés et enrichis en contenu. La géographie francophone actuelle semble privilégier le dernier terme (qui renvoie à un mot plus largement répandu dans d'autres secteurs de la discipline) même si il n'a pas été le premier à être utilisé. Ainsi, dans le « Dictionnaire de la géographie », P. Georges (1993, 5^e édition), parle dans le chapitre « front » de région pionnière qui « *peut se définir comme un secteur encore peu habité en cours de colonisation. On assiste à la disparition du paysage naturel et à l'élaboration d'un paysage humanisé. Le front pionnier est la frontière mouvante séparant les régions humanisées des contrées qui vont l'être* ». Pour H.Théry (in Brunet, 1996), « *un front pionnier est la limite extrême des défricheurs, des colons, des migrants qui viennent établir une colonie dans des terres jusque là vides ou peu peuplées... Il a une profondeur, il s'agit d'une frange pionnière plus que d'une ligne* ». Enfin D.Retailé (in Lévy & Lussault, 2003) le définit comme « *un espace mobile marquant la limite provisoire de l'expansion d'une société au sein d'un espace plus vaste, en cours de mise en valeur* ». A partir de ces définitions on perçoit que le front pionnier correspond à une transformation d'un espace « naturel » sous l'action de l'homme ; plus qu'une simple discontinuité entre l'œcoumène et le désert (au sens de vide « d'homme », les populations indigènes étant souvent laissées pour compte !) il s'agit d'un territoire au sens fonctionnel du terme mais on pourrait aussi le présenter en terme systémique : le front pionnier a une « profondeur spatiale », c'est un espace dans lequel les processus sociaux « produisent » du territoire en l'incorporant au domaine habité (systémogénèse). Bien sur, une grande variété de situations existe à l'heure actuelle (les fronts africains ou asiatiques différent de ceux d'Amérique latine, eux mêmes d'ailleurs hétérogènes) comme en comparaison avec le passé : les fronts du sud du Brésil, de l'ouest américain par exemple.

Le concept de front pionnier tire d'ailleurs son origine dans ce dernier exemple. C'est J.F.Turner (*The frontier in american history*, 1918, trad. 1963) qui pose les bases de la notion de frontière, non pas comme une ligne séparant deux territoires (Etats, nations, entités administratives), mais comme « *une limite mouvante qui sépare les régions peuplées de celles qui attendent de l'être* » ; pour lui ce processus est le fondement des caractéristiques (comme l'individualisme et la démocratie) de la société américaine. Dans les travaux de l'historien Turner on trouve des termes aux consonances très actuelles et géographiques : frontière de peuplement, villes frontières, front de pionniers, pôles d'attraction, villes nouvelles,... Il aborde également les étapes ou cycles de vie qui permettent de « *distinguer des frontières successives : celles du trafiquant, de l'éleveur, du mineur et du fermier* ». Finalement, Turner apparaît comme

le fondateur des composantes du concept de front pionnier *sans jamais l'écrire* (Le Dérout, 2004). I.Bowman (1931) est le premier à proposer une carte du monde des « *pioneer belts* », distinguant les espaces en cours d'intégration (*adjacent borders of permanently settled country*) des espaces pionniers au développement incertain (*areas of pioneer experimentation*). Pour lui, la liaison (route ou voie ferrée) entre cette frange pionnière et l'œcoumène est fondamentale : plus la gare est proche, plus la densité de population est importante et plus l'établissement humain provisoire a des chances de se pérenniser. Repris par A.Demangeon en 1932, les idées de Bowman ne seront que peu reprises avant les travaux de P.Monbeig, sans-doute en raison de l'intérêt plus grand porté par les géographes français pour les continents africain et asiatique.

C'est en effet, à partir de travaux menés au Brésil que resurgit la notion de front pionnier. En fait, en 1952, P.Monbeig parle de « région pionnière », « marche pionnière », « front de peuplement » sous le rôle moteur de l'économie du café. L'accent est mis sur le réseau de transport : « *grâce à la route et au camion, il devenait possible de pousser les défrichements non plus en avant mais de chaque côté des voies ferrées* ». Il esquisse ainsi la création d'un réseau urbain hiérarchisé dans la « frange pionnière ». Ce terme est préféré à celui de front car « *c'est rarement par une coupure brutale mais plutôt par une progression plus ou moins rapide que l'on passe des espaces organisés à ceux qui le deviennent* ». Sous l'impulsion de P.Monbeig, ce concept devient désormais un élément majeur de la géographie française. Il devient un élément de recherche pour ses étudiants qui suivent le déplacement vers l'ouest et le nord du Brésil des régions pionnières : H.Théry dans le Rondônia, M.Droulers dans le Maranhão, H.Rivière d'Arc dans le Mato Grosso.

Le renouveau du concept se précise avec M.Foucher (1974) et R.Pebayle (1974 et 1989). Ce dernier, dans ses travaux sur le Sud du Brésil ou sur le District Fédéral, montre que le front pionnier ne naît pas forcément sur un espace totalement vierge. Dans ses travaux le terme front pionnier remplace peu à peu la frange pionnière de P.Monbeig ; il propose même le terme de catena pionnière, s'inspirant des séquences pédologiques de versants. Surtout, il distingue le front pionnier « refuge » des petits agriculteurs sans terre ou chassés par la modernisation du front pionnier « *promotionnel, (...) plus conforme au modèle américain ou pauliste (...) alimenté par des colons en pleine ascension économique* ». Pour M.Foucher, le front pionnier est bien un exutoire à la réforme agraire et concrétise une triple intégration : géopolitique, commerciale et sociale. Les routes (et notamment la TAM, c'est à dire la Transamazonienne) deviennent les symboles du front pionnier mais avec des disparités : ainsi, la Brasilia-Belem devient « *une voie pionnière à l'extension de l'élevage bovin* » alors que la TAM devient « *un axe de drainage du surplus démographique* ».

Les travaux sur le Rondônia de H.Théry (1976, 1981) insistent sur le dynamisme des régions pionnières qui « *donnent à la région une organisation spatiale de front pionnier assez particulière* ». L'analyse spatiale permet d'affiner la notion de front pionnier : structuration linéaire (routes), polaire (villes) mais aussi parfois région complètement anarchique avec des vides relatifs (les fazendas) ou absolus (les forêts non encore défrichées). Finalement la région pionnière apparaît comme le stade le plus abouti de l'organisation spatiale du front pionnier mais qui garde aussi la trace des différents stades générant une sorte de « *palimpseste* ». Les publications suivantes de H.Théry (2000, 4^e Ed.) redonnent une place majeure aux régions pionnières dans la géographie du Brésil. L'exemple du Rondônia est aussi révélateur de la transformation du front

pionnier agricole en un front pionnier urbain. Finalement, réhabilité et enrichi, le concept de front pionnier trouve dans la nouvelle Géographie Universelle une place de choix dans le premier volume comme dans celui consacré à l'Amérique latine. Forgé en partie au Brésil, le concept s'exporte bien au-delà.

Au Mato Grosso, H.Rivière d'Arc (1977, 1978) et M.Coy (1986, 1987, 1996) montrent que, loin d'être un espace en continuité de l'œkoumène, le front pionnier procède par « bonds » à l'intérieur de la forêt. L'exemple des projets Humboldt, Juruena ou Indeco illustrent l'absence de contiguïté spatiale dans les régions pionnières alors séparées (à la fin des années 1970) par plusieurs centaines de kilomètres de forêts. Au-delà, la réflexion du rapport entre la taille des *municípios* et de l'espace réellement mis en valeur amènent M.Droulers et F.M. Le Tourneau (2000, 2002) à proposer une nouvelle cartographie de l'espace anthropisé : les densités de population sont ramenées aux espaces défrichés et exploités par les forestiers ; pour eux, « *les zones pionnières sont généralement des zones rurales assez denses au contact de zones encore vierges* ». Mais face à la montée des lois environnementales, aux lois de préservations, une certaine « finitude » de l'espace pionnier se dessine.

Finalement, les années 1980 et 1990 avec la diffusion des images de satellite, d'abord utilisées comme support d'illustration, vont permettre de quantifier le processus de déforestation ; les images satellites permettent aussi au géographe de mieux cerner les limites de son objet d'étude et d'une certaine manière d'enrichir le concept. En effet, l'actualité des transformations, la vitesse à laquelle elles se produisent, la diversité des niveaux scalaires auxquels on doit situer l'analyse, sont autant de raisons pour justifier le recours à l'utilisation de l'imagerie satellitaire. A chaque type de problème, à chaque échelle d'étude, un type de capteur et une démarche adaptée :

- Les images satellites permettent de définir de façon régionale les structures internes au front pionnier (tailles, mosaïques de formes et paysages), ce qui ne pouvait se faire auparavant que par enquête et généralisation de quelques exemples par principe localisés ;
- Les images satellites mettent en évidence le caractère éphémère localement de structures qui vont se répéter au-delà. Elles sont donc la représentation de formes passées (qui sont transformées et intégrées à l'œkoumène) de formes actuelles (visibles) et avec de fortes probabilités de se reproduire plus loin ;
- Les images satellites montrent également les processus de discontinuités et d'hétérogénéité de l'espace qui de continu (la forêt) devient discontinu (alternance de parcelles boisées et déboisées) puis à nouveau continu (espace agricole avec de, rares, témoins forestiers).

L'objet d'étude « front pionnier » est donc bien un système complexe d'interactions entre nature et société avec un cycle de vie propre, des formes inscrites spatialement susceptibles de se reproduire au cours du temps, des processus spécifiques de ruptures par rapport à un état existant.

112- Suivi des forêts tropicales par NOAA-AVHRR

Les études de suivi de l'occupation du sol à l'échelle régionale et continentale par imagerie satellitaire ont été rendues possibles par la mise au point dans les années 70 et 80 des capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) embarqués à bord des satellites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Ces plates-formes ont d'abord été orientées vers les études climatologiques et océanographiques, mais l'évolution postérieure du radiomètre embarqué AVHRR a permis d'étendre le champ de ces applications. Sur TIROS-N, lancé en 1978, 4 canaux existaient alors : 0.55-0.90 μm , 0.73-1.1 μm , 3.5-3.9 μm et 10.5-11.5 μm . A partir de NOAA-6, la bande passante du canal 1 a été réduite pour mieux discriminer les couverts neigeux (0.55-0.7 μm puis 0.58-0.68 μm): ainsi, ont pu également être calculés à partir de 1980 des indices de végétation combinant les informations du canal 1 et du canal 2 (proche infrarouge). A partir de NOAA-7, enfin, un cinquième canal a été ajouté (11.5-12.5 μm) afin de fournir de meilleures estimations des températures de surface de la mer (Tucker, 1996). Cette configuration de 5 canaux équipant le radiomètre AVHRR est toujours en place sur NOAA-17 lancé le 24 juin 2002.

La communauté scientifique dispose donc, théoriquement, de plus de vingt années d'archives de données à un kilomètre de résolution spatiale couvrant l'ensemble du globe (D'Souza et al., 1996) mais présentant un certain nombre de limites quant à la continuité des séries (Gutman & Ignatov, 1995). Ces informations ont d'abord été utilisées pour le suivi des cultures et notamment en Afrique où la crise du Sahel du début des années 80 a permis de cristalliser les efforts de nombreuses équipes de recherches pour essayer d'estimer et de cartographier les rendements des pâturages. Parallèlement les données AVHRR se sont révélées particulièrement efficaces pour la cartographie à petite échelle des grands biomes (Gond et al., 1997 ; Laporte et al., 1998) et notamment des forêts tropicales (programme TREES, Eva et al., 1999 ; Achard et al., 2001). Parmi les objectifs de ces travaux figuraient également, d'une part, de réaliser un inventaire planétaire des ressources (biodiversité) et d'autre part de tenter de fournir en entrée aux modèles climatiques une quantification des flux de carbone dans le cadre du "Global Change" (Townshend et al., 1993). Enfin, les changements rapides affectant la surface de la planète comme la déforestation ont également pu être suivis par les satellites NOAA, soit par l'intermédiaire de techniques de seuillages forêt/non-forêt utilisant les canaux 1 et 2 (indice NDVI ; Shimabukuro et al., 1997), soit en étudiant les données du canal 3 : en effet, la forte différence de réflectance ainsi que le contraste de température de surface entre les sols nus et la forêt (surtout en saison sèche) rend le canal 3 particulièrement efficace pour discriminer les surfaces forestières des régions déboisées : « *how AVHRR channel 3 presents such positive results in the detection of forest boundaries is still an open question* » (Di Maio Mantovani & Setzer, 1997). D'autres auteurs, enfin, utilisent une combinaison des informations fournies par le NDVI et les températures de surface (Lambin & Ehrlich, 1996 ; Ehrlich & Lambin, 1996).

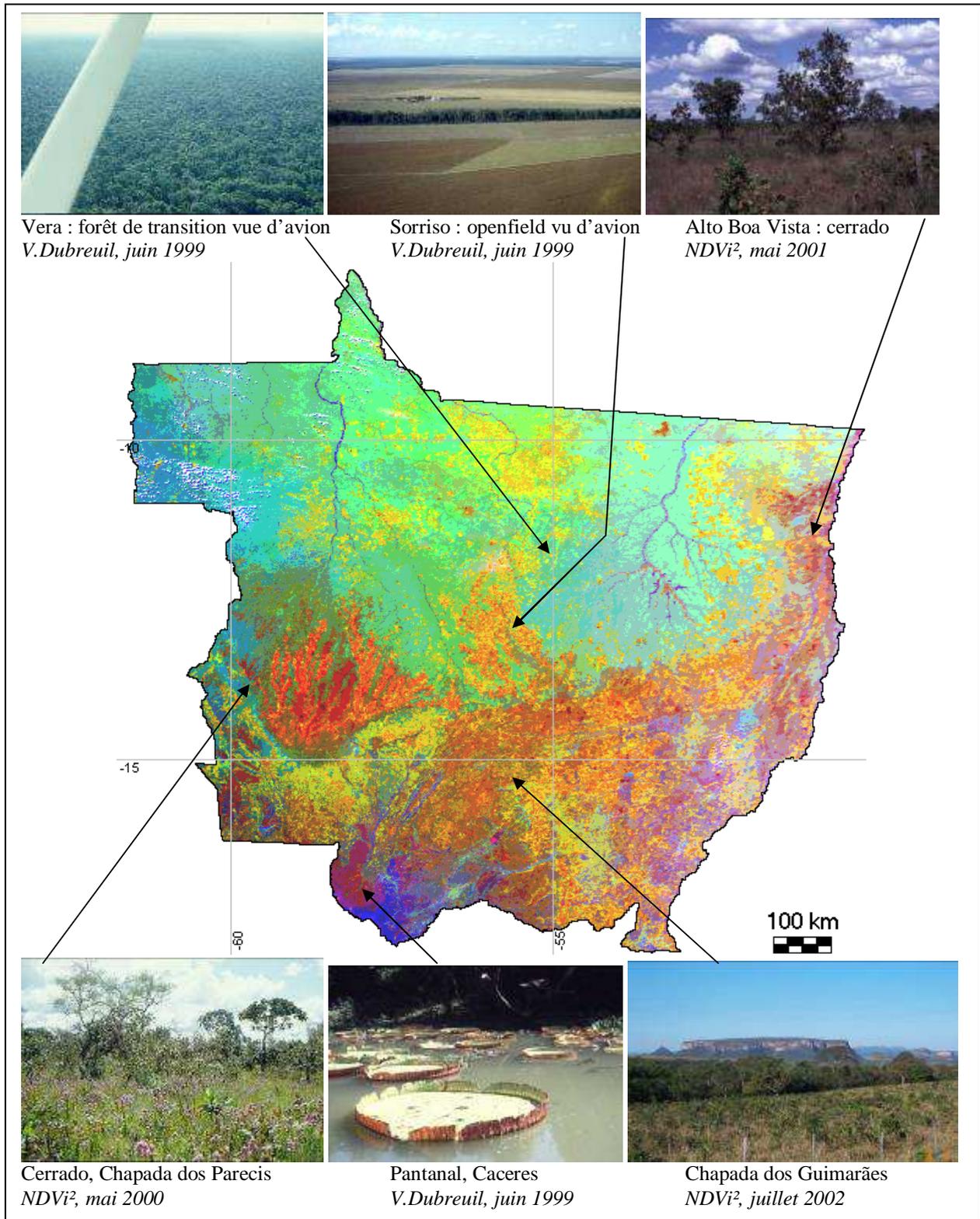
Pendant longtemps, la cartographie des forêts du Mato Grosso est restée assez imprécise. Ainsi, Durieux (2002) constate que l'étude bibliographique sur la végétation du Mato Grosso montre que « *les meilleures cartographies actuelles sont soit validées sur des données de références datant de plus de 25 ans, soit issues de méthodes difficilement reproductibles* ». Les travaux de références sur la végétation du Mato Grosso sont assez peu nombreux, le premier d'entre eux étant Sampaio (1916). De 1973

à 1983, le programme RADAMBRASIL (*Radar na Amazônia do Brasil*) a permis d'obtenir, à partir de données radar aéroporté au 1/250000, une cartographie par photo-interprétation au 1/1000000 des conditions naturelles de l'Amazonie puis de tout le pays (géologie, sols, végétation, ...). Partant du constat que « *la nébulosité de l'Amazonie est telle qu'au Brésil, il n'a jamais été possible de tenter d'en faire une couverture aérographique. Il n'existe que quelques clichés isolés, pris à des dates disparates, lors de coups de chance* » (Tricart, 1992), une couverture complète a été entreprise au moyen d'un radar en bande X (3,2 cm) embarqué à bord d'une Caravelle volant à 10000 mètres d'altitude. Placé sous l'autorité du Ministère des Mines et de l'Energie, les choix techniques ont privilégié l'inventaire des conditions géologiques et géomorphologiques, la bande X se révélant assez peu apte pour discriminer les différents types de couverts végétaux. Il existe en outre un décalage entre la date de réalisation et d'édition des différentes coupures : 1980 pour Juruena, 1982 pour Cuiaba, 1978 pour Porto Velho... Il s'agit cependant d'un inventaire majeur quant à l'ensemble des ressources mobilisées et des efforts entrepris par les scientifiques brésiliens : « *Des ouvriers-acrobates, hautement spécialisés, descendaient des hélicoptères avec des échelles de corde, sur la cime des grands arbres puis, de la, au sol et ouvraient à la tronçonneuse une clairière ou ensuite, les hélicoptères venaient déposer les scientifiques qui ouvraient leurs hayons au coupe-coupe* » (Tricart, 1992). Ces cartes RADAMBRASIL ont été reprises et actualisées par l'IBGE de 1988 à 1993 et servent encore de référence pour bon nombre d'études à petite échelle, y compris pour la validation des cartographies réalisées par l'imagerie radar satellitaire JERS (Saatchi, 2000). En 1997, a été publiée une synthèse dans le cadre du PRODEAGRO (projeto de desenvolvimento agroambiental do estado do MT) : ce travail, réalisé à partir de l'état 1994 et de toutes les connaissances existantes (climat, sols) constitue une des meilleures synthèses disponibles.

Rodriguez-Yi et al. (2000) ont proposé une première mise à jour en 8 classes de la carte de la végétation du Mato Grosso intégrant des classifications supervisées d'images NOAA. Par la suite, reprenant les travaux théoriques de Zadeh (1965) sur la logique floue, L. Durieux (2002) a tenté d'utiliser les cartes du PRODEAGRO et les données AVHRR pour réaliser une nouvelle cartographie de la couverture forestière matogrossense. Les données utilisées étaient les données journalières des canaux 1 et 2 de NOAA-11 de juin 1993 et un Modèle Numérique de Terrain. Dans ce cas, le canal 1 a permis de bien différencier les grands biomes (forêts-savanes-contacts) alors que le canal 2 a permis une bonne discrimination intra-biome. Les travaux montrent que « *la méthode mise au point peut conduire à des résultats comparables à ceux obtenus par une classification supervisée classique tout en étant beaucoup moins consommatrice de données de terrain (...) mais ce n'est pas suffisant pour justifier son emploi pour toute l'Amazonie* » ; « *les limitations de ces classifications proviennent essentiellement des images NOAA-AVHRR elles-mêmes* » (résolutions spatiale et spectrale trop grossières). Les perspectives offertes par les nouveaux capteurs MODIS ou CBERS-WFI (satellite chino-brésilien) devraient également permettre une meilleure discrimination des couverts.

A partir de ces différents travaux, il est possible de synthétiser les informations disponibles afin de présenter le cadre géographique de ce travail. Selon une démarche déjà employée pour l'étude des paysages de la France (Dubreuil & Regnaud, 1997), les grandes unités de paysages matogrossenses apparaissent ainsi lisiblement sur une image NOAA-AVHRR. Nous utiliserons dans ce cas l'imagerie satellitaire comme un outil d'exploration élémentaire d'un territoire (figure 1.1).

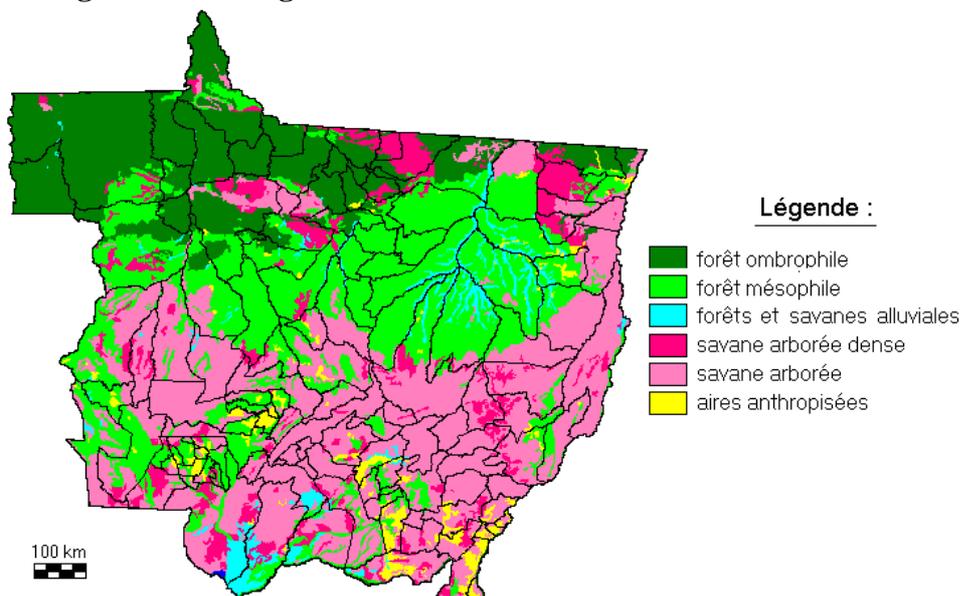
Figure 1.1 : Les grands types de paysages du Mato Grosso : localisation sur une image NOAA-AVHRR du 10/07/1997 (composition colorée 1,2,4) :



Les grands types de paysages apparaissent très distinctement sur cette image. L'Etat du Mato Grosso (environ 900.000 km²) se situe à la charnière de trois grands ensembles géographiques (Miranda & Amorim, 2001) :

- Au sud et à l'est s'étendent les paysages des cerrados (41% de la surface de l'Etat) où domine l'élevage associé à des cultures diverses (soja, maïs): les récoltes sont effectuées à la date de prise de vues (saison sèche) et ce sont essentiellement des sols nus qui apparaissent d'où cette teinte orangée, combinaison d'une forte réflectance dans le canal 1 (rouge), de fortes températures de surface et d'une faible réponse dans le proche infrarouge (végétation inexistante, sols nus ou couverts de plantes herbacées desséchées). La diversité des teintes renvoie à la diversité des paysages des cerrados (Aubreville, 1961), denses et arborés (*cerradão*) ou simplement herbeux (*campo limpo*, Dubreuil, 2002). « *Les cerrados sont actuellement en voie de disparition selon les études de l'ONG Conservation International, qui les classe au 12^e rang des 25 écosystèmes les plus menacés dans le Monde* » (Théry & de Mello, 2003).
- A l'extrême sud de l'Etat (sud-ouest de la capitale Cuiaba) apparaît le complexe marécageux du Pantanal-Alto Paraguai (7% de la surface de l'Etat). L'aspect sombre résulte surtout de l'absorption par l'eau des rayonnements dans le visible et le proche infrarouge. L'aspect bleuté est la conséquence de températures de surface moins élevées du fait de la plus forte teneur en eau des sols.
- Au centre et au nord, surtout, s'étendent les régions forestières (52% de la surface de l'Etat) parcourues par un dense réseau hydrographique, aux vallées périodiquement inondées (*varzeas*), qui relève du système amazonien: d'ouest en est se succèdent les fleuves Roosevelt-Aripuana, les rio Arinos et Teles Pires (qui se rejoignent au nord de l'Etat pour former le Tapajos), l'imposant éventail du Xingu et le complexe du rio Araguaia aux limites des Etats de Goiás et du Tocantins. Le vert plus ou moins bleuté s'explique par la densité du couvert végétal et par des températures de surface plus faibles. Comme pour les cerrados, une grande diversité existe dans les types de forêts, plus ou moins denses et stratifiées (figure 1.2) en fonction des sols et de la topographie (figure 1.3).

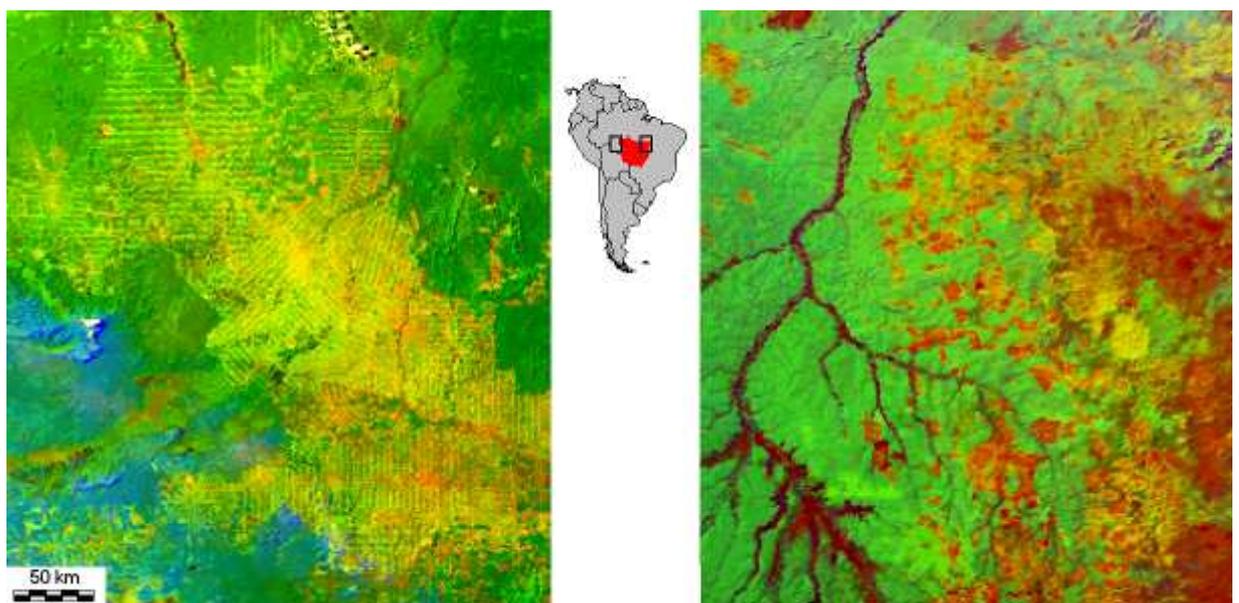
Figure 1.2 : la végétation du Mato Grosso ; source : RADAMBRASIL



L'importance du couvert forestier dans cet Etat permet de prendre la mesure à la fois de l'immensité du domaine amazonien mais aussi de sa grande diversité. Ainsi la transition entre les cerrados et la forêt ombrophile (qui ne se généralise véritablement qu'au nord de l'Etat) est assez variée : au sud-ouest, par exemple, la Chapada dos Parecis montre un cas intéressant de paysage de forêt galerie, les lanières des plateaux étant occupées par des paysages très ouverts alors que les vallées qui vont vers le nord ont conservé leur forêt.

Le suivi des forêts tropicales par imagerie AVHRR pose, en outre, le problème de l'adéquation spatiale de l'outil par rapport à la réalité observée. En Asie et en Afrique de nombreux modes de mises en valeur de régions forestières ont été réalisés sans coupe claire dans la forêt: agriculture itinérante, exploitation sélective des ressources en bois peuvent alors être difficiles voire impossibles à détecter par les images NOAA. Seule l'imagerie à haute résolution (Landsat, SPOT) peut montrer les pistes forestières ou les secteurs d'éclaircissements plus ou moins temporaires de la forêt ; dans ces cas, au mieux, « *AVHRR defines areas where further investigation with finer resolution sensors is required* » (Lucas, 1996). Au Brésil, en revanche, les défrichements ont souvent été plus massifs et radicaux montrant une relation à la nature plus prédatrice avec l'arrière-pensée de l'aspect "inépuisable" de la ressource. Les défrichements à grande échelle pour la colonisation agricole publique (« arêtes de poissons » du Rondônia ; Bastos-Lage, 1993) ou sous forme de vastes fazendas d'élevage (Est du Mato Grosso et Para) sont alors particulièrement spectaculaires et parfaitement identifiables sur une scène NOAA (Batista & Tucker, 1994) comme le montrent les images de la figure 1.4 prises en juillet 2000 par le satellite NOAA-14. Une telle image pose la question de l'ampleur des transformations causées par l'Homme dans cette partie du monde et notamment la question de la quantification des surfaces forestières disparues.

Figure 1.4 : Défrichements au Rondônia (à gauche, image du 26/07/2000) et à l'est du Mato Grosso (à droite, image du 18/07/2000) vus par NOAA-14 : la composition colorée 1,2,4 permet de visualiser les forêts en vert



113- Quantification de la déforestation : l'Etat déboisant le plus dans le pays déboisant le plus...

Sur les 2 milliards d'hectares de forêts tropicales (l'ensemble des forêts de la planète représentant 3,5 milliards d'hectares soit 27% des terres émergées, Pomel & Salomon, 1998), on estimait qu'à la fin du vingtième siècle 14 à 16 millions d'hectares disparaissaient chaque année. Ce phénomène est propre aux régions tropicales, la forêt tempérée ayant plutôt tendance à progresser depuis un siècle (en Europe notamment, Hotyat et al., 1997), après, il est vrai, une intense exploitation et un recul considérable depuis le Moyen Age. La diminution des surfaces en forêts tropicales est un phénomène plus récent mais bien plus rapide : ce n'est pas l'apanage du Brésil ou de l'Amérique tropicale, il s'agit d'un phénomène global qui touche l'ensemble des continents de cette zone. Les travaux menés par la FAO en 1996 (tableau 1.1) permettent de préciser la part respective des différentes régions du monde dans ce processus :

	Afrique		Amérique latine		Asie		Total	
	1980	1990	1980	1990	1980	1990	1980	1990
% forêts denses	26,4	24,7	63,3	59,1	39,4	35,1	43,8	40,6
% forêts denses et ouvertes	45,8	43,4	70,0	65,4	45,2	40,7	55,4	51,7
Taux de déforestation 1980-1990 (en % de surface forêts denses 1980)	6,5 (+/-1,2)		6,7 (+/- 1,5)		11,1 (+/- 2,2)		7,4 (+/- 1,0)	

Tableau 1.1 : Estimation des taux de couverture (en % de la surface continentale) des forêts tropicales

Source : FAO, 1996

En valeur relative, c'est donc surtout l'Asie (Indonésie, Malaisie, Thaïlande, Philippines) qui a connu les taux les plus élevés de déforestation. Mais, rapporté à la surface réellement défrichée, **c'est bien le Brésil qui occupe la première place, étant responsable d'environ un dixième de la déforestation annuelle, soit plus du double de l'Indonésie**, second « Etat défricheur » (les 10 Etats défrichant le plus concentrant 50% de la déforestation mondiale). L'importance des défrichements au Brésil ne doit cependant pas occulter les autres régions amazoniennes où la déforestation est très active (Sierra, 2000 ; Perz et al., 2005).

Le gouvernement brésilien a donc assigné comme tâche à l'INPE (*Instituto Nacional das Pesquisas Espaciais*) d'effectuer un suivi par satellite de la déforestation en Amazonie : le Brésil dispose en effet des deux-tiers, soit 4 sur les 6,4 millions de kilomètres carrés, de la forêt amazonienne. Le programme PRODES (*Programa de Monitoramento do desmatamento na Amazônia Legal*) permet ainsi de disposer chaque année de données chiffrées sur l'état d'avancement de la déforestation au Brésil. Le suivi a d'abord été réalisé de façon « manuelle » à partir d'une photo-interprétation des 229 scènes Landsat-TM nécessaires pour couvrir l'Amazonie brésilienne. Ces données Landsat sont acquises directement par l'INPE depuis 1973 à partir de la station de

réception au sol de Cuiaba (Engle F.C., 2000). Concrètement les ingénieurs travaillaient à l'origine sur des compositions colorées Landsat-TM (canaux 3,4,5) au 1:250000 mais, depuis 2001, le programme est passé en mode entièrement numérique.

En 2003, l'INPE estimait la superficie déboisée au Mato Grosso à 169034 km² contre 77360 en 1989 et 20.000 en 1978 (tableau 1.2). En valeur absolue cet Etat se trouve donc en deuxième position derrière l'Etat du Para (210032 km²) et devant le Maranhão (103045 km²). Les taux annuels de déboisement, comparables à ceux du Rondônia, montrent des surfaces bien plus importantes vu la taille de l'Etat, soit une perte annuelle de 4 à 8.000 km² de forêt (Alves et al., 1992 ; INPE, 1996). En fait, chaque année le Mato Grosso représente environ, comme l'Etat du Para, un tiers de la déforestation brésilienne soit près de 6500 des 18000 km² de forêt coupée chaque année. Depuis 1978, en revanche, la part du Mato Grosso dans le total de la surface déboisée (figure 1.5) est passée de 13 à 27% (celle du Para passant de 37 à 34%). Les variations interannuelles des chiffres de la déforestation s'expliquent surtout par la conjoncture économique fédérale (Fearnside, 2005), les politiques menées au niveau de chaque Etat pouvant aussi ne pas être sans conséquence. Ainsi, la « *diminution relative des défrichements entre 1988 et 1991 est généralement attribuée à l'arrêt des prêts à l'élevage en 1987 et à la crise économique de 1989-90 (...) le record de 1995 est souvent interprété comme une conséquence de la libéralisation économique* » (Durieux, 2002).

Enfin, depuis 2002 et surtout en 2004, la reprise de la déforestation peut en partie être attribuée au développement des cultures d'exportation et au premier rang d'entre elles, le soja. **Ainsi, en 2004, le Mato Grosso a représenté près de la moitié de la déforestation brésilienne** (12586 sur les 26130 km² défrichés, deuxième valeur la plus élevée après 1995 !).

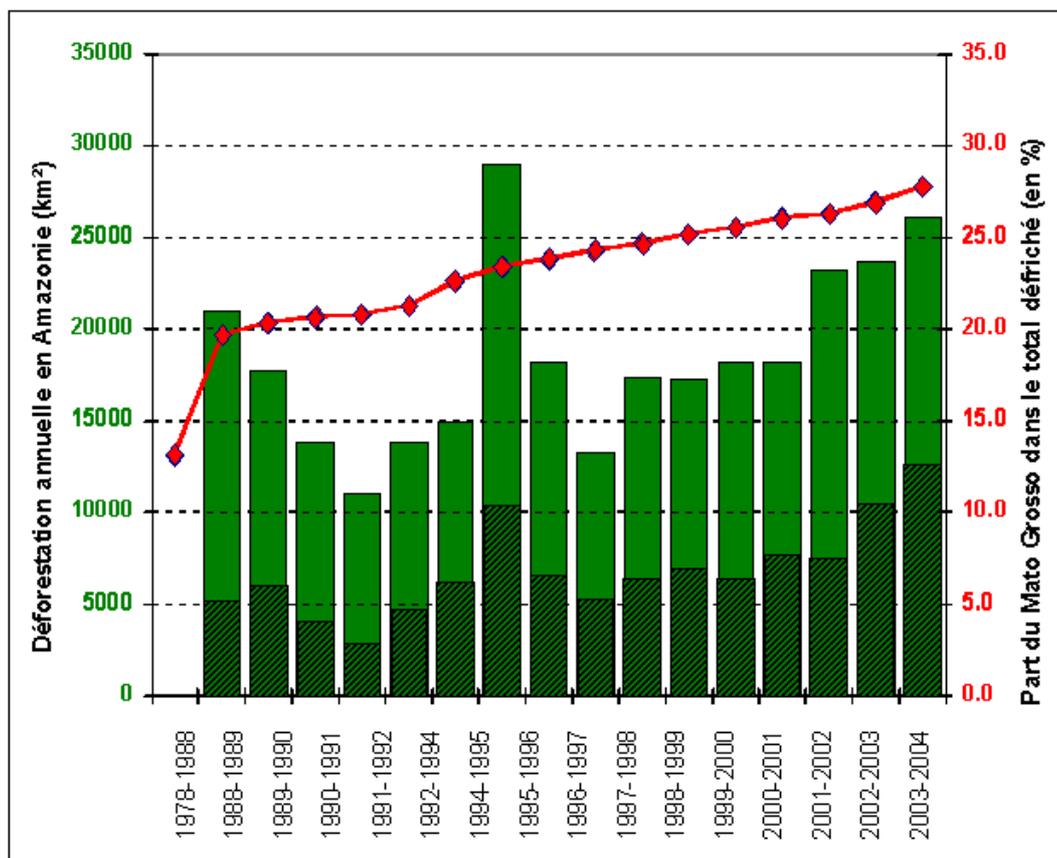
	Acre	Amapa	Amazonas	Maranhão (*):57800	Mato- Grosso	Para (*):39800	Rondônia	Roraima	Tocantins	Total Amazonie
1978-01	2500	200	1700	63900	20000	56400	4200	100	3200	152200
1988-04	8700	800	16800	88400	71400	126300	27600	3000	19700	362700
1989-08	9240	930	17980	89820	77360	132050	29030	3630	20430	380470
1990-08	9790	1180	18500	90920	81380	136940	30700	3780	21010	394200
1991-08	10170	1590	19480	91590	84220	140720	31810	4200	21450	405230
1992-08	10570	1626	20279	92725	88894	144507	34075	4481	21859	419016
1994-08	11534	1626	21019	93469	101334	153075	39265	4961	22525	448808
1995-08	12742	1635	23133	95214	111725	160920	43995	5181	23322	477867
1996-08	13175	1635	24156	96275	118268	167055	46427	5395	23642	496028
1997-08	13533	1653	24745	96684	123539	171194	48413	5579	23915	509255
1998-08	14069	1683	25415	97696	130005	177023	50454	5802	24491	526638
1999-08	14510	1683	26135	98926	136968	182134	52812	6022	24707	543897
2000-08	15057	1683	26747	99991	143337	188805	55277	6275	24951	562123
2001-08	15476	1690	27381	100949	151040	194042	57950	6620	25140	580288
2002-08	16203	1690	28397	102279	158618	202739	61555	6674	25399	603554
2003-08	16752	1694	29194	103045	169034	210032	65018	7000	25535	627304

Tableau 1.2: Surface totale déboisée en km² par Etats (Amazonie brésilienne)

(*): en italique, en incluant les déforestations "anciennes" (pour Maranhao et Para)

Source : PRODES, INPE, Sao Jose dos Campos, 1996-2005

Figure 1.5 : Variations annuelles du total déboisé en Amazonie brésilienne (vert) et au Mato Grosso (hachures) et part du Mato Grosso dans le total déboisé (d'après INPE, 2005).



Conscient de l'intensité et de la gravité du phénomène, l'Etat du Mato Grosso a mis en place son propre programme de suivi de la déforestation. En 1999, la FEMA (*Fundação Estadual do Meio Ambiente do Mato Grosso*) a ainsi été chargée de contrôler par satellite et levés de terrain l'extension de la déforestation dans l'ensemble de l'Etat (dos Santos Leite, 2002). Par rapport aux travaux de l'INPE, il s'agissait également de prendre en compte la « déforestation » des milieux de cerrado ignorés par l'INPE. En général les chiffres avancés par la FEMA sont donc plus élevés que ceux de l'INPE (tableau 1.3), les principales différences entre les chiffres fournis par les divers organismes résultant de la confusion de ces définitions (Fearnside, 2002).

Tableau 1.3 : Estimations comparées des aires déboisées (en km²) au Mato Grosso :

Cumuls bisannuels	FEMA (<i>desmatamento</i>)	INPE (<i>desflorestamento</i>)
1994-1995	30124	16611
1996-1997	25368	11814
1998-1999	18106	13429
2000-2001	12232	14072

Sources : INPE, 2005 et dos Santos Leite, 2002

Les travaux de la FEMA, plus détaillés, permettent d'avoir une bonne image de la déforestation en complétant les chiffres bruts à la taille des parcelles déboisées et surtout aux propriétés foncières ; en effet, en parallèle au suivi de la déforestation, la FEMA est chargée d'un inventaire systématique des levés géographiques des propriétés et des réserves forestières légales de celles-ci. La majorité des déboisements au Mato Grosso sont de grande dimension (tableau 1.4) : les parcelles déboisées supérieures à 100 hectares représentaient en 2000-2001 64% de la surface déboisée totale (72% en 1998-1999). A l'opposé, la contribution des aires déboisées de petite taille (moins de 6,25 hectares : une famille installée dans un système d'agriculture traditionnelle de subsistance défrichant en moyenne 3 hectares chaque année ; Metzger, 2001) ne représentait que 2% de la superficie totale déboisée en 2000-2001.

Tableau 1.4 : Répartition de la surface déboisée en fonction de la taille des secteurs observés en 2000-2001 (d'après Fearnside, 2002) :

Parcelles déboisées de un à 6,25 hectares =	2%	de la superficie totale déboisée
« « 6,25 à 15 hectares =	5%	« «
« « de 16 à 50 hectares =	16%	« «
« « de 51 à 100 hectares =	13%	« «
« « de 101 à 200 hectares =	16%	« «
« « de 201 à 500 hectares =	20%	« «
« « de 501 à 1000 hectares =	14%	« «
« « de 1001 à 3000 hectares =	12%	« «
« « de 3001 à 10000 hectares =	2%	« «

Depuis 2000, la loi fédérale stipule que la « réserve légale » doit représenter 80% de la surface de la propriété en région forestière (50% auparavant lors de l'adoption du code forestier brésilien en 1965) et 35% en région de cerrado (20% auparavant). Par ailleurs, le gouvernement du Mato Grosso a adopté une mesure spécifique de 50% pour la région de transition. Les propriétaires sont tenus de respecter et faire enregistrer cette réserve légale auprès de la FEMA ; il en va de même pour les « aires de préservation permanente » situées à proximité des cours d'eau et des secteurs à forte pente. En 2002 seulement un million d'hectares (sur les 40 millions d'hectares de terres privées) étaient mises en conformité à la législation. Pourtant les progrès sont réels, facilités en partie par l'inégale répartition des terres au Mato Grosso : selon l'INCRA, 20.000 propriétaires détiennent 88% de la superficie privée. Par ailleurs, 12% des propriétés ont plus de 2000 hectares et représentent 67% de la superficie de l'Etat. A l'opposé les 59% de propriétés de moins de 200 hectares ne disposaient que de moins de 6% de la superficie (dos Santos Leite, 2002). Les autorisations de déboisement sont en principe soumises à autorisation auprès de la FEMA (si la surface à déboiser est supérieure à 200 hectares) ou à l'IBAMA (si la surface à déboiser est inférieure à 200 hectares). Dans la pratique, en 2000-2001, seulement 40000 hectares (sur 790000, soit 5%) des défrichements de plus de 200 hectares ont été effectivement autorisés par la FEMA (Fearnside, 2002). L'aspect peu dissuasif des amendes (1000 à 1500 reais par hectare), la relative faiblesse de contrôles (2 à 3000 par an), sans compter les nombreux recours en justice et la corruption sont autant de freins à l'efficacité réelle du système.

Cependant, en 2002, espérant un impact de la politique étatique sur la déforestation, certains voulaient croire que le phénomène marquerait le pas au Mato Grosso alors que les défrichements s'intensifiaient dans l'ensemble de l'Amazonie (Fearnside,

2002, 2003). Le changement de gouverneur et le nouvel élan donné à la culture du soja depuis 2002 semblent au contraire avoir donné une nouvelle impulsion aux défrichements. Afin d'affiner l'analyse et mener une politique plus active d'intervention sur le terrain, l'INPE mène depuis un an un nouveau programme (DETER : *Detecção em Tempo Real do desflorestamento na Amazônia*) en utilisant « en temps réel » les images journalières MODIS et des données du satellite sino-brésilien CBERS (Valeriano et al., 2005).

A ce phénomène « brut » de déforestation, il faut ajouter la part des forêts qui sont dégradées, en avant du front pionnier, par l'exploitation forestière. Les chiffres sont encore plus difficiles à obtenir sur ce phénomène mais on estime que ce sont chaque année de 10 à 15000 km² des forêts amazoniennes brésiliennes qui sont dégradées par l'exploitation du bois. L'enquête au Para de Nepstad (1999) sur 1400 exploitants du bois produisant 50% des bois traités et 75 scieries régionales responsables de 90% de l'exploitation du bois de l'Amazonie montre qu'en 1996-97, « la surface des forêts concernée par l'extraction du bois correspond, selon les régions, à une surface comprise entre 50 et 90% de la surface totalement déforestée » (Lindsey, 2004) ; des proportions comparables ont été estimées pour l'Afrique centrale (Zhang et al., 2005). En outre, le prélèvement sélectif des espèces commerciales prélève ou détruit 10 à 40% de la biomasse en place ce qui favorise la pénétration de la lumière et l'assèchement du sous-bois : les parcelles exploitées par le bois sont donc très sensibles à la propagation du feu à partir des zones agricoles voisines : « durant l'épisode El Niño 1997-1998, rien que dans l'Etat du Roraima, plus de 13000km² de forêt ont brûlé entre le 01/12/1997 et le 30/04/1998 » (Durieux, 2002). Enfin, se pose également le problème de la perte de biomasse consécutive à la fragmentation des niches écologiques car le morcellement des espaces forestiers modifie le microclimat (turbulences accrues) et modifie la pollinisation et le cycle de nutriments : « en moyenne, les portions de forêts situées à moins de 100m de la lisière perdent 36% de leur biomasse (3,5 à 4,1 t/ha/an) au bout de 10 à 17 ans » (Laurence et al., 1997). Là aussi un suivi par satellite de cette activité est possible (Souza & Barreto, 2000) dans la mesure où les chemins de débardage pour l'exploitation du bois en forêt sont visibles au début sur les images Landsat mais disparaissent au bout de 3-5 ans.

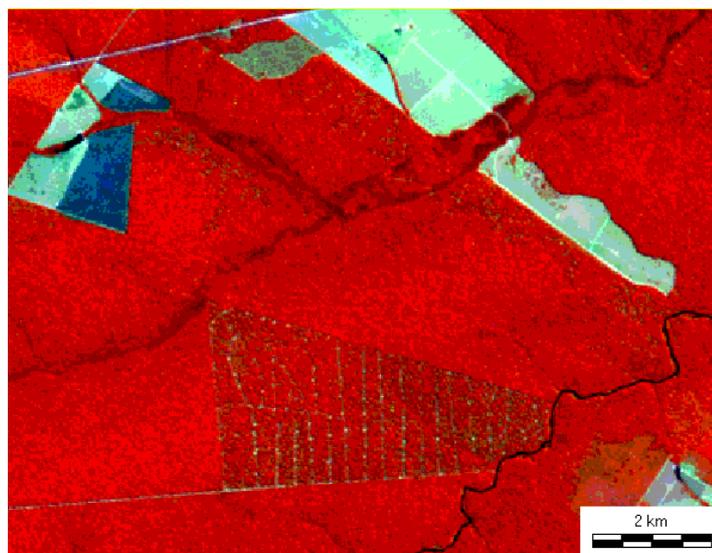


Figure 1.6 : Chemins d'exploitation forestière sur le município de Santa Carmem (fazenda Santa Cruz), à l'est de Sinop : image Landsat du 19 août 1999, composition colorée 4,5,3

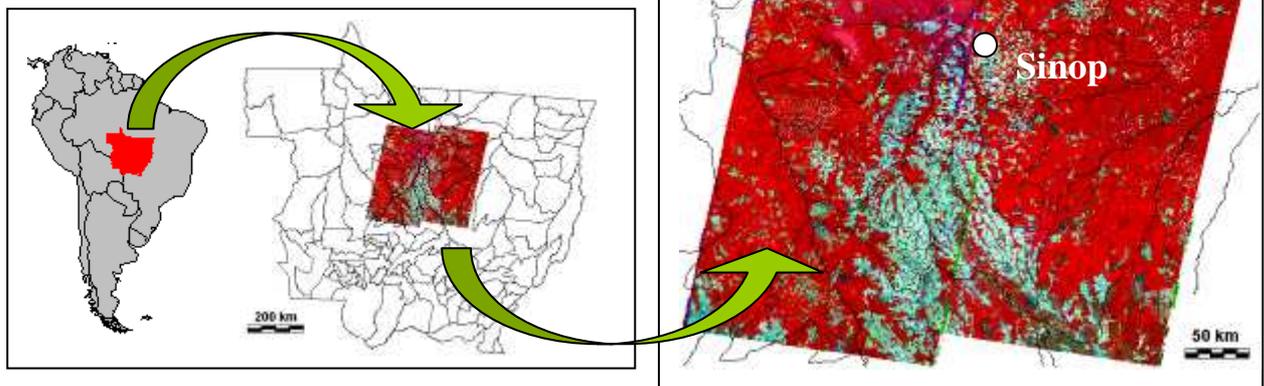
Cependant, contrairement à une image reçue, le bois amazonien occupe encore une place modeste dans le commerce international. En 2000, Fleury estimait que 80% du bois participant au commerce international provenait d'Asie, 15% d'Afrique et seulement 5% d'Amérique Latine « *dont la forêt hétérogène rend difficile l'exploitation qui n'a commencé que récemment* ». En fait, au niveau global, seulement 4% des bois tropicaux prélevés sont exportés, l'essentiel (85%) servant comme bois de chauffe et charbon (le charbon de bois représente 40% de la consommation énergétique de l'ensemble des pays tropicaux ; Pomel & Salomon, 1998) et 10% étant utilisés localement comme bois d'œuvre. Le Brésil, qui détient 25 à 30% des ressources mondiales en bois tropicaux (Fleury, 2000), utilise pour son marché intérieur les trois-quarts du bois exploité sur son territoire (moins de 14% des bois amazoniens sont exportés, Théry & Mello, 2003), l'Etat du Para fournissant 80% du bois tropical exporté par le Brésil. Au Mato Grosso, le groupe des forestiers « *madereiros* » constitue un lobby de poids bien que très disparate : à Sinop, où l'activité des scieries a été jusqu'à la fin des années 90 la principale source de richesse, ce secteur conserve une forte influence sur le plan politique local. Dans cette ville, face aux critiques des organisations écologistes et de santé sur la qualité de l'air liée aux brûlis et aux émissions de scieries, le syndicat des industries du bois de Sinop (SINDUSMAT) répond que « *les fumées sont un mal nécessaire pour que soient maintenus les emplois mais aussi les habitations, l'eau, l'énergie électrique et l'assistance sociale offerte par les scieries* » (Dos Santos, 1999) ! Autre exemple, à Juruena, la scierie Rudhen a longtemps été le principal employeur du *município* (310 employés en 1993 auxquels sont mis à disposition 85 maisons avec eau et électricité gratuites). L'entreprise est la propriété d'Apolinario Stüller (Santa Catarina) qui a monté son entreprise à partir d'une filiale du sud et s'est spécialisé dans la fabrication en portes et fenêtres exportées vers l'Italie. D'abord élu préfet de Juruena, il a en 1995 menacé « *d'expulser de son entreprise tous les ouvriers qui ne voteraient pas pour son candidat* » (Le Borgne David, 1996). Les exploitants du bois jouent également un rôle important dans l'établissement des colons lors des premières années en leur achetant les bois commercialisables voire en ouvrant les premières pistes d'exploitation.

Enfin, parmi les inquiétudes récentes, il faut également souligner le fait que plusieurs clairières de défrichement et d'exploitation du bois sont apparues dans les réserves indigènes (Fearnside, 2002). L'ensemble des réserves (indigènes, parcs naturels, etc...) représentent 17,8% de la superficie du Mato Grosso et sont plutôt situées dans la moitié nord de l'Etat : les 56 réserves indigènes (16% de la superficie de l'Etat soit 14,7 millions d'hectares) ont ainsi connu un rythme annuel moyen de déforestation de 22000 hectares depuis 1993, mais avec un chiffre de 56686 hectares en 2001 ! (dos Santos Leite, 2002). Malheureusement, depuis 2003, la FEMA n'est plus en mesure de fournir une actualisation des surfaces défrichées, ses objectifs ayant été largement redéfinis lors du changement de gouverneur en 2002. En 2005, toutes les activités de la FEMA ont finalement été suspendues...

114- La nécessité d'un suivi à échelle régionale de la déforestation au Mato Grosso

Pour actualiser les données de déforestation rapidement et pour l'ensemble de l'Etat du Mato Grosso, il est donc nécessaire d'avoir recours à d'autres sources de données : celles de l'INPE restent une référence fiable mais elles ne sont disponibles qu'après un laps de temps assez long. Pour pallier ces difficultés, plusieurs auteurs ont développé l'utilisation de données satellitaires à basse résolution de type NOAA-AVHRR ou, plus récemment, SPOT-Végétation. Même si les chiffres bruts souffrent d'une certaine imprécision (Hayes & Sader, 2001 ; dos Passos, 1998), ces travaux, généralement validés à partir de scènes Landsat-TM (Shimabukuro et al., 1999) ou SPOT (Selleron, 1995) ont confirmé leur intérêt, notamment pour les secteurs défrichés de grande taille (plus de 3,1 km² d'après di Maio Mantovani et Setzer, 1997). Une étude systématique sur le centre nord du Mato Grosso a été réalisée dans le cadre du programme financé en 2002-2004 par le Ministère des Affaires Etrangères et l'Ambassade de France au Brésil : *"Impact socio-économique et environnemental des nouveaux aménagements sur l'axe amazonien BR-163 Cuiabá (MT) - Santarem (PA) : Quelles perspectives pour le secteur agricole?"*. Ce programme (sous la responsabilité de P.Mendez du CIRAD/EMBRAPA) a permis de réaliser l'historique des aménagements et de la mise en valeur le long de la BR-163 (notamment l'expansion récente du soja) et d'envisager les conséquences de l'asphaltage de cette route prévu dans le cadre du programme « Avanço Brasil ». Dans ce cadre, j'étais chargé de réaliser le suivi de l'occupation du sol et de la déforestation dans le centre du Mato Grosso (région de Sinop, figure 1.7).

Figure 1.7 : Localisation du secteur d'étude sud du programme « BR-163 » et scènes LANDSAT utilisées

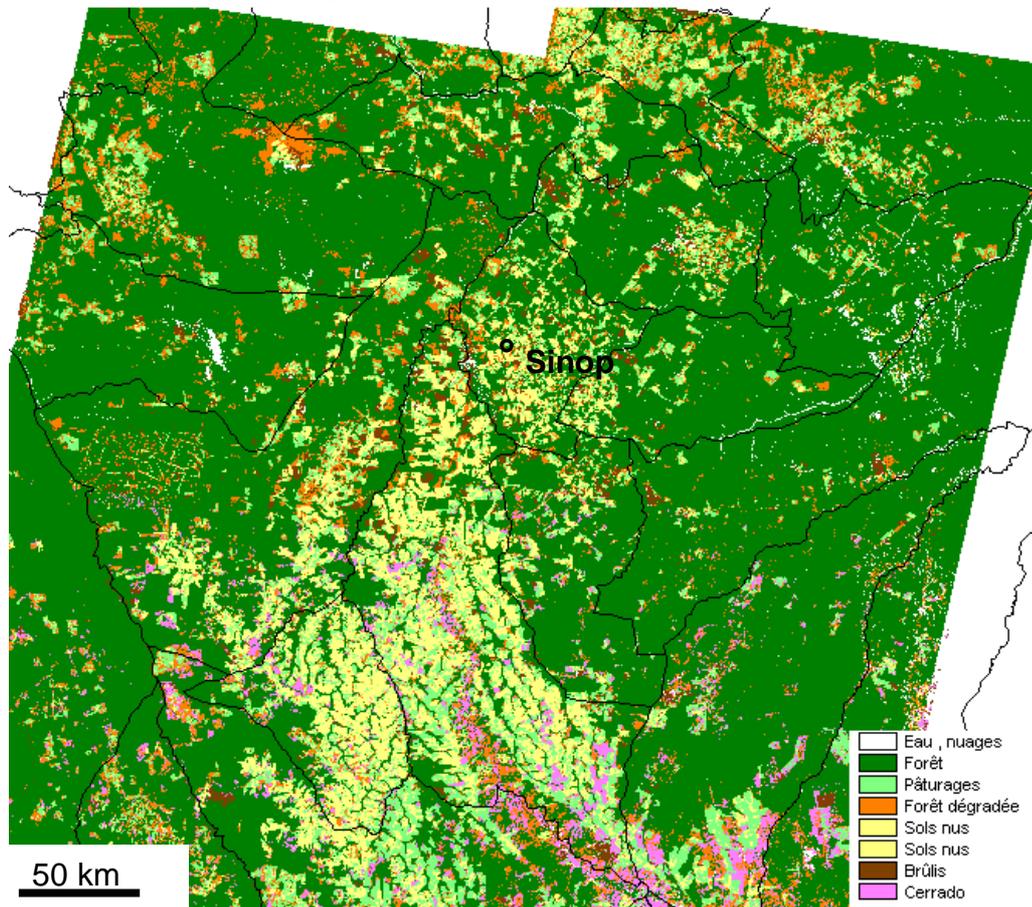


Pour définir l'occupation du sol dans la région de Sinop, on a utilisé 4 images Landsat 7-ETM+ (Woodcock et al., 2001) du mois d'août 1999 et 4 images TM du mois de mai 1992 fournies par le TRFIC (Michigan State University). L'image est d'abord mise en projection cartographique (UTM 21s) afin d'être compatible avec les limites géographiques des *municípios*. Le traitement effectué est une composition colorée en RVB en retenant respectivement les canaux 4 (proche infrarouge), 5 (infrarouge moyen) et 3 (rouge). Ce type de traitement permet de bien discriminer les principaux types de végétation sur les images Landsat. Ensuite une classification automatique non supervisée a été effectuée (Idrisi cluster) et les classes obtenues ont été simplifiées en 6 thèmes d'après les données acquises sur le terrain (post regroupement). Un filtrage

médian 3x3 permet finalement de lisser l'image en éliminant les pixels isolés (figure 1.8).

Figure 1.8 : Occupation du sol dans la région de Sinop en 1999 :

Traitement : V.Dubreuil ; Images Landsat 7 ETM+ : TRFIC, MSU.



Le même travail a été réalisé pour l'année 1992 et la comparaison de l'occupation du sol en forêt permet de suivre l'évolution de la déforestation dans ce secteur (tableau 1.5) en ne conservant en 1992 et 1999 que 2 classes (forêt / non-forêt). La simple comparaison de classifications à des dates différentes est généralement la méthode la plus robuste pour détecter des changements « brutaux » de l'occupation du sol comme la déforestation, même en dehors des conditions idéales (images de la même date prise dans des conditions similaires ; Mas, 1998 et 1999 ; Rogan et al., 2002).

Dans cette région, plus de 9000 km² ont été défrichés entre 1992 et 1999, dont plus de la moitié dans les 3 *municípios* de Nova Ubiratan, Tapurah et Sorriso. En valeurs relatives, les plus forts taux de défrichements (près de 20%) concernent Sinop, Tapurah et Sorriso. **La région choisie pour cette étude correspond donc bien à une des régions les plus dynamiques en terme de déforestation et de développement de projets agricoles. De manière incontestable, les défrichements se sont donc concentrés de part et d'autre de la BR-163 qui continue donc de jouer un rôle majeur dans le processus de colonisation agricole et de déforestation.**

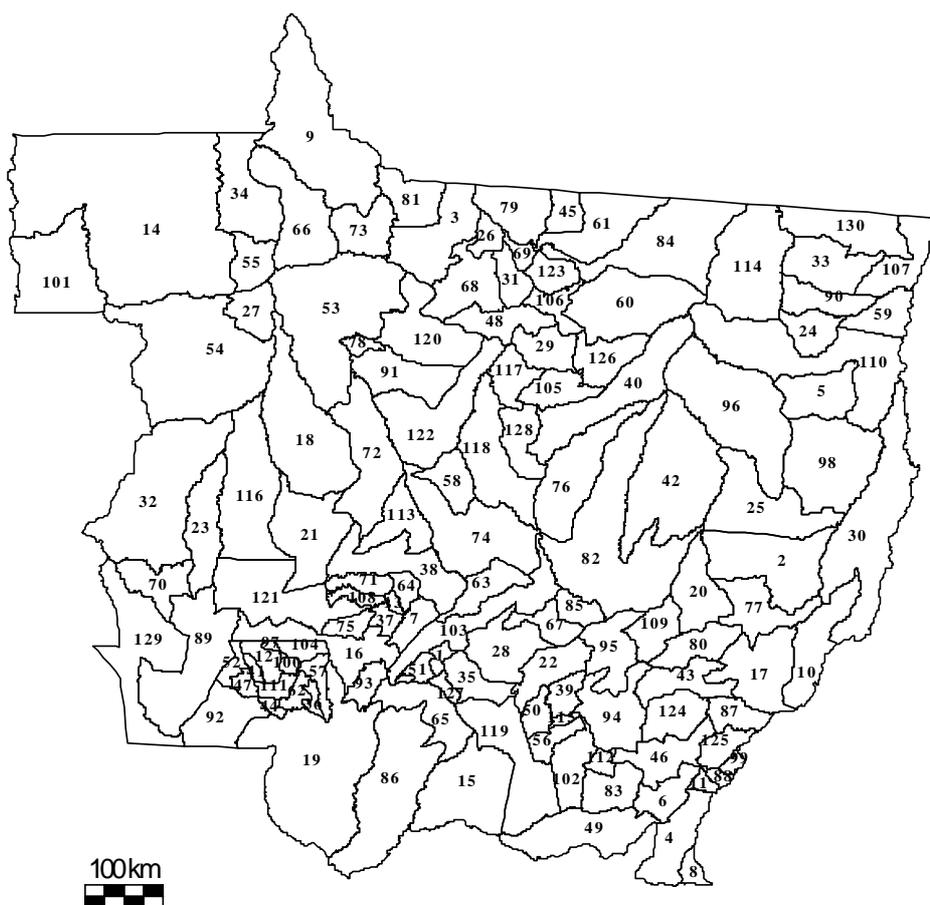


Figure 1.9 : Carte des municípios du Mato Grosso (situation 1998)

1 Acorizal	31 Colider	61 Matupa	91 Porto dos Gauchos	121 Tangara da serra
2 Agua boa	32 Comodoro	62 Mirassol d' oeste	92 Porto Esperidião	122 Tapurah
3 Alta Floresta	33 Confresa	63 Nobres	93 Porto Estrela	123 Terra nova do norte
4 Alto Araguaia	34 Cotriguaçu	64 Nortelandia	94 Poxoreo	124 Tesouro
5 Alto Boa Vista	35 Cuiaba	65 Nossa Sa livramento	95 Primavera do leste	125 Torixoreo
6 Alto Garcas	36 Curvelandia	66 Nova Bandeirantes	96 Querencia	126 União do sul
7 Alto Paraguai	37 Denise	67 Nova Brasilandia	97 Reserva do Cabacal	127 Varzea Grande
8 Alto Taquari	38 Diamantino	68 Nova Canaa do norte	98 Ribeirão Cascalheira	128 Vera
9 Apiacas	39 Dom Aquino	69 Nova Guarita	99 Ribeiraozinho	129 Vila Bela da santissima trindad
10 Araguaiana	40 Feliz Natal	70 Nova Lacerda	100 Rio Branco	130 Vila Rica
11 Araguainha	41 Figueiropolis d' oeste	71 Nova Marilandia	101 Rondolandia	
12 Araputanga	42 Gaucha do norte	72 Nova Maringa	102 Rondonopolis	
13 Arenapolis	43 General Carneiro	73 Nova Monte verde	103 Rosario oeste	
14 Aripuana	44 Gloria d' oeste	74 Nova Mutum	104 Salto do ceu	
15 Barão de Melgaco	45 Guaranta do norte	75 Nova Olimpia	105 Santa Carmem	
16 Barra do Bugres	46 Guiratinga	76 Nova Ubiratan	106 Santa Helena	
17 Barra do Garcas	47 Indaiavai	77 Nova Xavantina	107 Santa Terezinha	
18 Brasnorte	48 Itauba	78 Novo Horizonte do N.	108 Santo Afonso	
19 Caceres	49 Itiquira	79 Novo Mundo	109 Santo Antonio do L.	
20 Campinapolis	50 Jaciara	80 Novo Sao Joaquim	110 São Felix do araguaia	
21 Campo Novo dos Parecis	51 Jangada	81 Paranaita	111 São José dos 4 marcos	
22 Campo Verde	52 Jauru	82 Paranatinga	112 São Jose do povo	
23 Campos de julio	53 Juara	83 Pedra preta	113 São Jose do rio claro	
24 Cana Brava do norte	54 Juina	84 Peixoto de Azevedo	114 São Jose do xingu	
25 Canarana	55 Juruena	85 Planalto da serra	115 São Pedro da cipa	
26 Carlinda	56 Juscimeira	86 Pocone	116 Sapezal	
27 Castanheira	57 Lambari do oeste	87 Pontal do Araguaia	117 Sinop	
28 Chapada dos Guimarães	58 Lucas do rio verde	88 Ponte Branca	118 Sorriso	
29 Claudia	59 Luciará	89 Pontes e Lacerda	119 Sto Antonio de leverger	
30 Cocalinho	60 Marcelandia	90 Porto Alegre do norte	120 Tabapora	

Tableau 1.5 : Déforestation par *município* (limites 1998) entre 1992 et 1999
(d'après images Landsat)

	Surface référence município	Forêt <i>stricto sensu</i> 1992	Forêt 1992 en km ²	Forêt <i>stricto sensu</i> 1999	Forêt 1999 en km ²	Déforestation 1992-1999 en km ²	% du município déboisé entre 1992 et 1999	Forêt 1992 en %	Forêt 1997(*) en %	Forêt 1999 en %
<i>União do Sul</i>	4641.4	4583.6	4607.6	4101.6	4273.6	-310.0	6.7	98.8	94.5	92.1
<i>Tabapora</i>	8893.6	7589.6	7613.6	6923.9	7268.3	-321.3	3.6	85.3	90.3	81.7
<i>Itauba</i>	4555.2	3997.9	4021.9	3360.3	3407.9	-590.0	13.0	87.8	84.0	74.8
<i>Nova Ubiratan</i>	9902.4	8732.3	8756.3	7302.8	7613.9	-1118.5	11.3	88.2	89.4	76.9
<i>Vera</i>	4117.8	3616.3	3640.3	3116.5	3122.5	-493.8	12.0	87.8	82.3	75.8
<i>Santa Carmem</i>	3668.7	3428.4	3452.4	3077.8	3136.3	-292.1	8.0	93.5	87.3	85.5
SINOP	3466.3	2627.7	2651.7	1936.1	1982.2	-645.5	18.6	75.8	65.7	57.2
<i>Tapurah</i>	11506.5	10048.1	10072.1	7985.9	8012.4	-2035.6	17.7	87.3	71.2	69.6
<i>Sorriso</i>	9932.9	4995.7	5019.7	2985.9	3015.9	-1979.8	19.9	50.3	44.3	30.4
<i>Claudia</i>	4034.9	3657.2	3681.2	3080.6	3151.4	-505.9	12.5	90.6	81.7	78.1
<i>Lucas do Rio V</i>	3536.9	1346.9	1370.9	1046.0	1047.7	-299.3	8.5	38.1	35.2	29.6
<i>Feliz Natal (**)</i>	11689.0	11369.0	11393.0	7070.0	11070.0	-299.0	2.6	97.3	95.0	94.7
<i>Santa Helena</i>	2448.2	1806.0	1830.0	1268.1	1444.2	-361.8	14.8	73.8	67.3	59.0
	82393.7	67798.8	67822.8	53255.5	58546.3	-9252.5	11.2	82.3	74.4	67.1

(*) données 1997 d'après la FEMA

(**) chiffres de Feliz Natal estimés (couverture nuageuse et scène tronquée à l'est)

Afin de couvrir un espace plus vaste et disposer d'un plus grand nombre d'observations chaque année, nous avons réalisé une extrapolation à partir de données NOAA acquises au mois de juillet. La méthode retenue est celle du seuillage du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*; Rouse et al., 1973; Tucker, 1979; Gutman, 1987, 1991): cet indice de végétation utilise les canaux 1 (rouge) et 2 (proche infrarouge) du radiomètre AVHRR,

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R}) / (\text{PIR}+\text{R})$$

et se révèle particulièrement adapté au suivi du couvert végétal, même si « *sa capacité de discrimination à l'intérieur des différentes formations est très limitée* » (Bastos-Lage, 1993). Nous avons confronté les données Landsat TM acquises sur le *município* de Sinop avec les données NOAA-AVHRR. L'absence de scène NOAA bien dégagée sur le secteur en 1999 nous a conduit à utiliser une image de l'année 2000. Pour le *município* de Sinop, nous avons obtenu +4% de différence pour l'année 1992 et -5% pour le binôme 1999-2000 entre les estimations par Landsat et celles faites avec NOAA-AVHRR, ce qui nous a permis d'extrapoler la méthode sur tout le secteur pour les années 1990, 1995 et 2002 (figure 1.10 et 1.11).

Le tableau 1.6 ci-dessous présente les résultats des traitements effectués à partir des données NOAA-AVHRR pour l'ensemble des *municípios* du centre du Mato Grosso. Dans cette région ce sont près d'un cinquième des forêts qui ont été coupées entre 1990 et 2002. En plus des *municípios* déjà cités, on peut observer que la déforestation, principalement après 1999, gagne des *municípios* plus éloignés de la BR-163 comme Tabapora, Vera, Porto dos Gauchos ou Nova Ubirata. L'image permet de relativiser « *la stabilité actuelle des fronts pionniers après la phase de défrichement massif de la décennie 80* » (Waniez et al., 1999): dans cette partie de l'Amazonie, les programmes de colonisation agricole et les déboisements ont

continué de façon massive, même si, comme nous le verrons par la suite, les causes et les acteurs ont pu évoluer.

Figure 1.10 : Extension des surfaces boisées dans le centre du Mato Grosso (images NOAA)

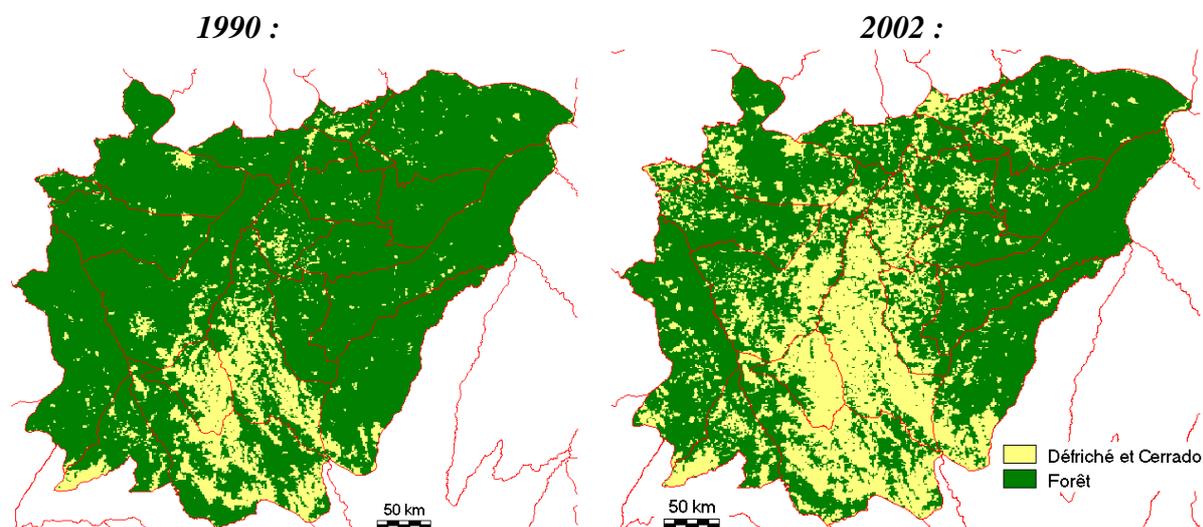


Figure 1.11 : Evolution du couvert forestier de 1990-2000 d'après les images NOAA-AVHRR :

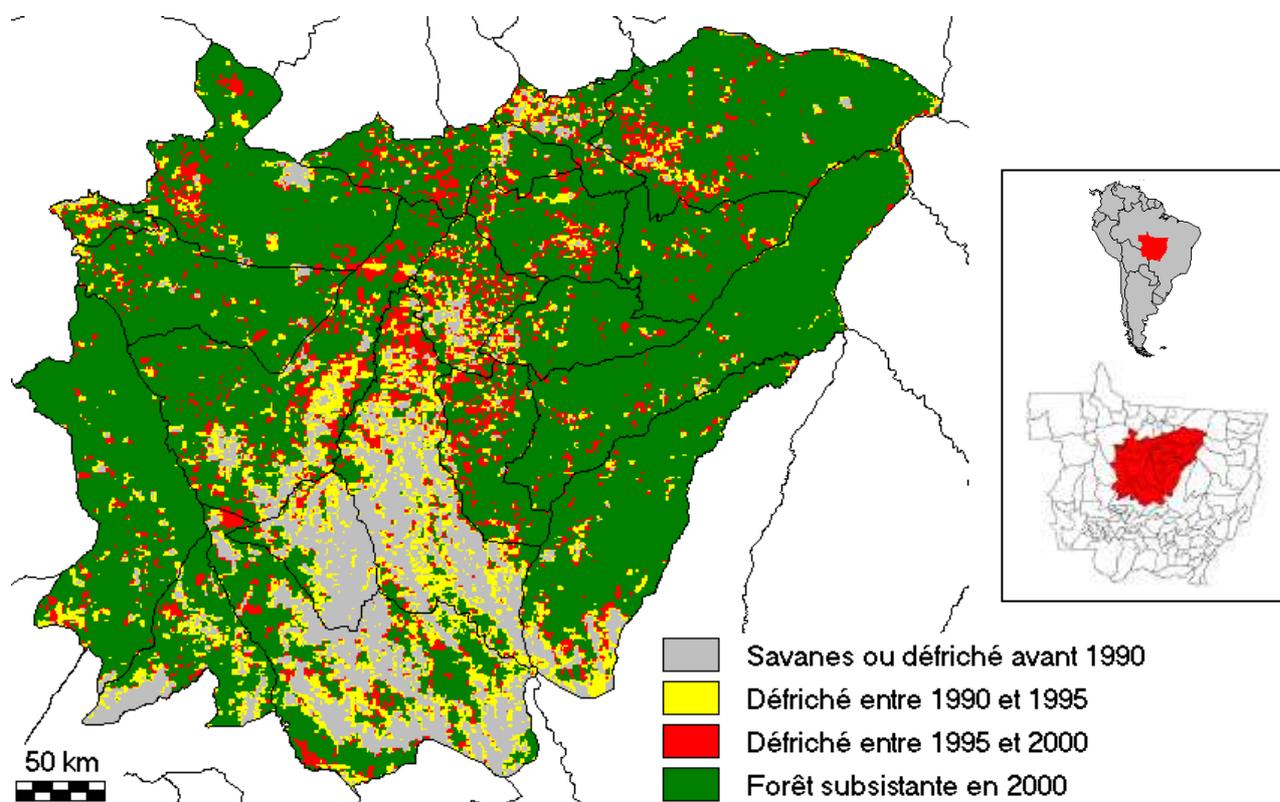
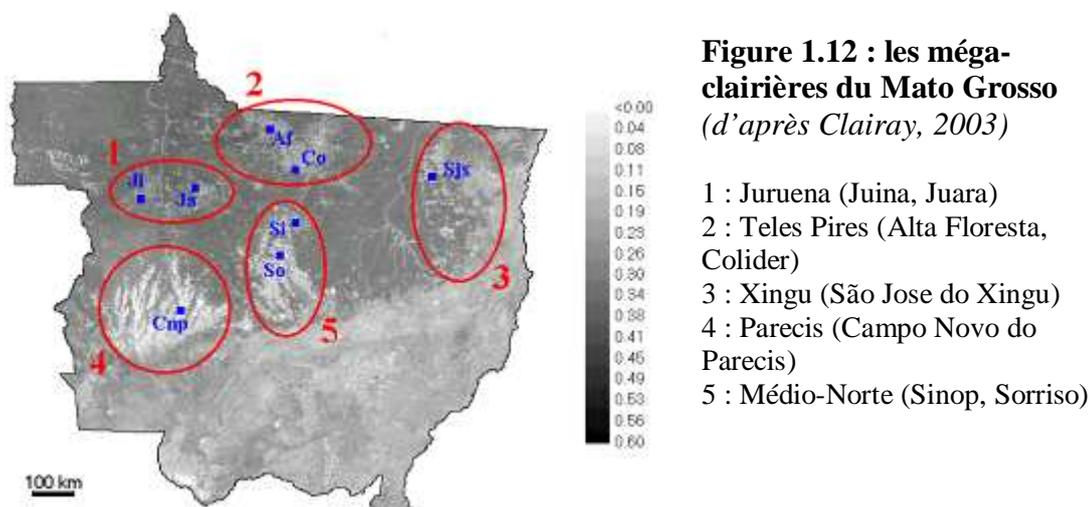


Tableau 1.6 : Surface totale déboisée en km² par município (d'après images NOAA-AVHRR)

	Surface référence município	Forêt 1990 Km ²	Forêt 1992 Km ²	Forêt 1995 Km ²	Forêt 1997 Km ²	Forêt 2000 Km ²	Forêt 2002 Km ²	Déforestation 1990-2002 en km ²	% município déboisé entre 1990 et 2000	Forêt 1990 en %	Forêt 2000 en %	Forêt 2002 en %
União do Sul	4645	4627	4623	4493	4485	4330	4320	-307	6.6	99.6	93.2	93.0
Marcelandia	12285	11969	11817	11504	11313	10708	10845	-1124	9.2	97.4	87.2	88.3
Tabapora	9037	8697	8692	8316	8392	8000	7021	-1676	18.6	96.2	88.5	77.7
Itauba	4467	4278	4189	4041	4024	3414	3519	-760	17.0	95.8	76.4	78.8
Novo Horizonte	956	905	853	684	711	557	460	-445	46.6	94.7	58.3	48.1
Porto dos Gau.	6585	6449	6400	6175	6157	5926	5295	-1154	17.5	97.9	90.0	80.4
Nova Ubiratan	10136	9299	9000	8394	8300	8350	7800	-1499	14.8	91.7	82.4	76.9
Vera	4155	3987	3906	3709	3742	3047	2320	-1667	40.1	96.0	73.3	55.8
Santa Carmem	3667	3546	3491	3375	3377	3160	2984	-562	15.3	96.7	86.2	81.4
SINOP	3442	3006	2742	2438	2256	1838	1538	-1468	42.7	87.3	53.4	44.7
Tapurah	11455	10381	10241	8944	8381	7886	6551	-3830	33.4	90.6	68.8	57.2
Sorriso	10046	5399	3506	2913	2800	2617	1851	-3549	35.3	53.7	26.0	18.4
Claudia	4005	3905	3863	3682	3587	3224	3075	-830	20.7	97.5	80.5	76.8
Lucas do Rio V.	3577	1275	923	692	716	825	688	-587	16.4	35.7	23.1	19.2
Feliz Natal	11732	11551	11540	11384	11316	11237	11258	-292	2.5	98.5	95.8	96.0
Nova Mutum	13145	8382	6787	5971	5966	6121	5737	-2645	20.1	63.8	46.6	43.6
Sao Jose RC	4784	3633	3456	2985	3269	3195	2956	-677	14.1	75.9	66.8	61.8
Nova Maringa	10900	10615	10581	10139	10195	10072	9624	-991	9.1	97.4	92.4	88.3
Santa Helena	2452	2166	2008	1885	1760	1617	1547	-620	25.3	88.4	66.0	63.1
	131471	114072	108618	101723	100746	96123	89389	-24683	18.8	86.8	73.1	68.0

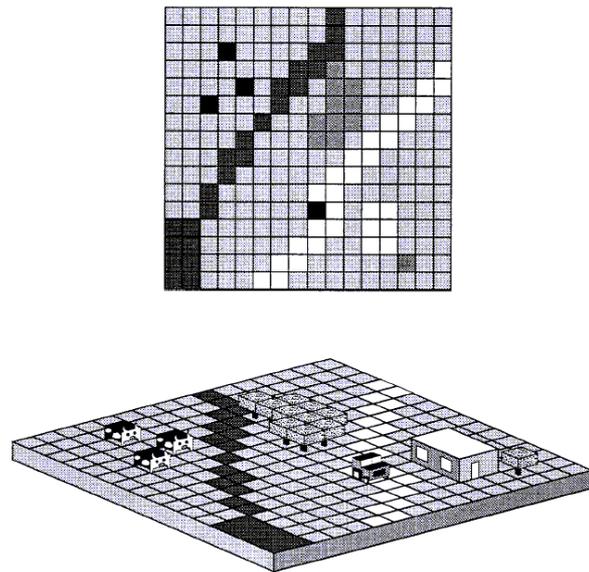
Surfaces estimées (nuages)

A partir de l'étude de ces images NOAA, M. Clairay (2003) a proposé pour l'ensemble du nord du Mato Grosso une subdivision en 5 grands ensembles défrichés : elle a proposé d'appeler « ces immenses ouvertures dans la végétation pseudo-naturelle (...) des méga-clairières ». La figure 1.12 montre le NDVI calculé le 10 juillet 1997 (saison sèche) sur le Mato Grosso. On distingue ainsi facilement la moitié sud de l'Etat où l'indice est faible en raison de la dominante de sols nus et de paysages de savanes. Au nord, l'indice est plus élevé, du fait de la couverture forestière dominante, sauf dans les grands secteurs déboisés (figure 1.12°).



Bien que les thèmes d'occupation du sol paraissent simple (forêt / non-forêt) et correspondent le plus souvent à des parcelles de grande taille, la résolution kilométrique de AVHRR pose tout de même la question de la mixité des pixels, ne serait-ce qu'aux limites des classes d'occupation du sol (Cherchali et al., 2000 ; Belward & Lambin, 1990). Frohn et al. (1996) ont montré que lorsque la déforestation couvre moins de 15% de l'espace (dans le cas du schéma en 'arrêtes de poissons' du Rondônia), elle peut passer inaperçue à la résolution kilométrique. De manière plus générale, insistant sur le biais de n'avoir du monde qu'une vue « pixelisée », Fisher (1997) met en garde contre « ce piège et illusion » figure 1.13)

figure 1.13 : The pixel view of the world
(source : Fisher, 1997)



Pour résoudre ce problème de la mixité inhérente au pixel, de nombreux algorithmes et méthodes ont été proposés. Généralement basées sur la comparaison entre données NOAA et des images à plus haute résolution (Landsat, Spot ; Mayaux & Lambin, 1995 ; Atkinson et al., 1997), ces techniques permettent d'améliorer de 20 à 30% les résultats obtenus avec l'imagerie AVHRR seule. Plusieurs auteurs ont également proposé des algorithmes de démixage spectral (Roberts & al. in Lunetta & Elvidge, 1999) ou textural (Mayaux & Lambin, 1997) afin de mieux préciser la nature des changements enregistrés sur les images satellites. De manière plus générale, cela pose le problème de la nature de l'information géographique « contenue » dans le pixel, ou plus précisément de l'EIFOV (Effective Instantaneous Field of View) qui représente « la dimension de l'aire au sol qui va réellement marquer le signal enregistré dans un pixel » (Clairay, 2003). Par ailleurs, la précision de localisation des pixels des images NOAA et la déformation importante sur les bords des scènes du fait de l'importance de la fauchée de AVHRR pose problème sur sa capacité à détecter des changements sur de grandes surfaces (Hu et al., 2000 ; Roy, 2000) comme le Mato Grosso (figure 1.14) ; c'est la raison pour laquelle, seul le centre-nord du Mato Grosso a été traité dans un premier temps. Enfin, la bande proche infrarouge de NOAA-AVHRR est large et fortement affectée par l'absorption par la vapeur d'eau ce qui rend problématique la comparaison entre les NDVI calculés avec AVHRR et ceux obtenues avec d'autres capteurs plus récents comme MODIS (Gao, 2000).

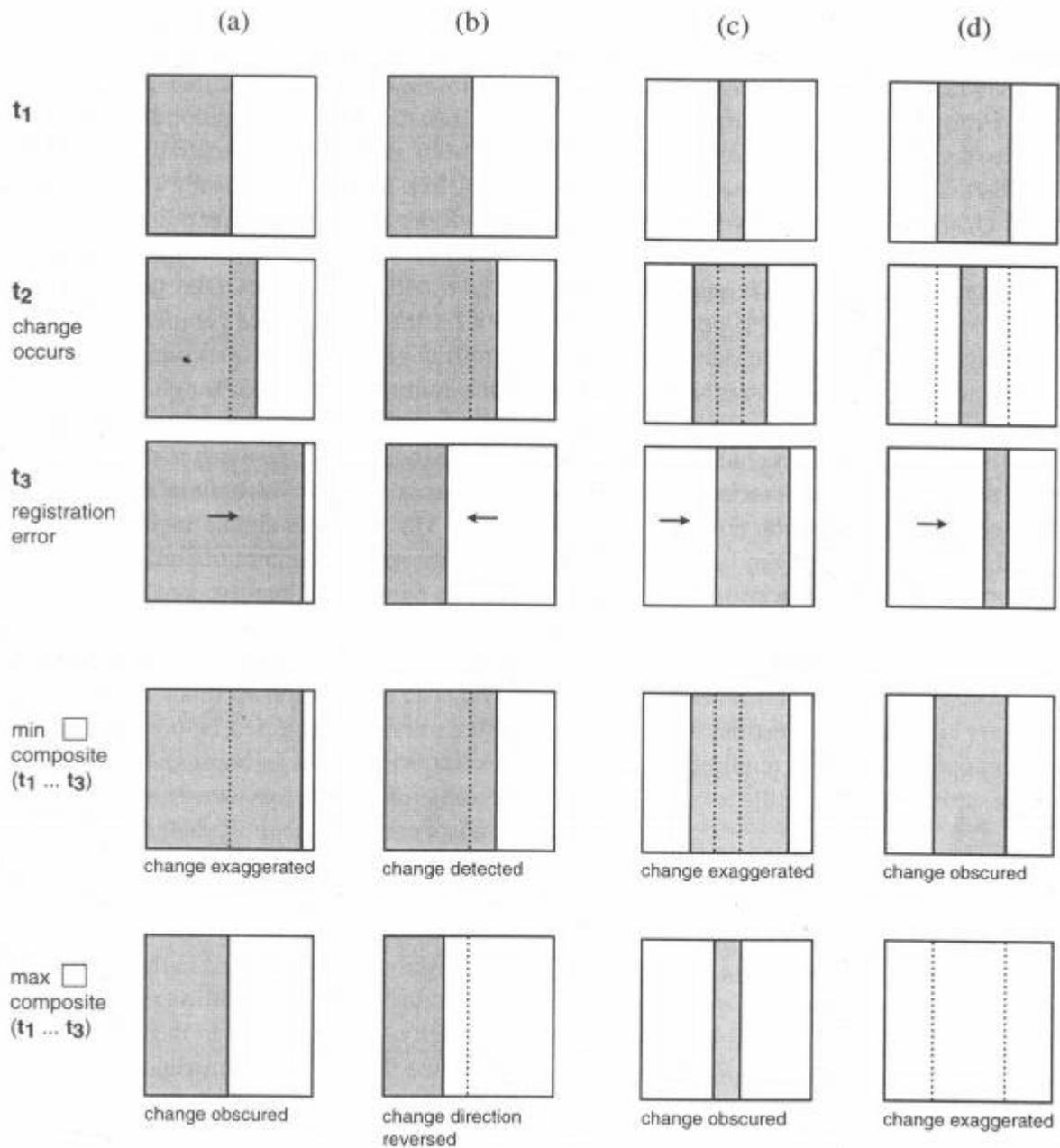


Figure 1.14 : Types de changements spatiaux et impact des erreurs de positionnement (calage des images) sur les méthodes de détection par minimum et maximum composite

Source : Roy, 2000

Afin d'étendre notre recherche sur l'ensemble du Mato Grosso, nous avons préféré avoir recours aux données fournies par SPOT Végétation qui, par rapport à NOAA-AVHRR, « *provides a better imagery acquisition geometry and additional reflective bands* » (Carreiras et al., 2002). Pour cette étude, une série temporelle de NDVI issues d'images SPOT Végétation à une résolution kilométrique (1998-2003) a été exploitée. Les synthèses de NDVI décennales (produits S10) sont effectuées à l'aide du Maximum Value Composite. Il aurait été possible d'utiliser également les produits D10 qui font l'objet de correction de la réflectance bidirectionnelle (Maisongrande et al., 2004). Toutefois, des effets de segmentation trop importants ont été constatés sur des études parallèles menées en Bretagne (thèse en cours de R.Lecerf) et nous avons donc préféré les produits S10 aux D10. En outre, la période couverte par les images S10 est plus longue que pour les images D10. Il est important de souligner que les produits issus des deux satellites sont prétraités différemment : pour SPOT/VGT, les effets angulaires ne sont pas pris en considération ; les données NOAA/AVHRR sont largement filtrées et bénéficient de l'apport des canaux dans l'infrarouge thermique (qui font défaut à SPOT/VGT) pour améliorer le masque nuageux.

Un premier travail a consisté à reprendre la méthode utilisée pour les images AVHRR pour seuiller le NDVI chaque année à partir des images de la saison sèche (juillet-août). Les images ainsi produites sont des cartes de la surface forestière qui doivent être validées à partir des images Landsat et de contrôles terrain (figure 1.15). Mais pour un suivi plus réaliste du phénomène « déforestation » nous cherchons également à développer une méthode plus adaptée.

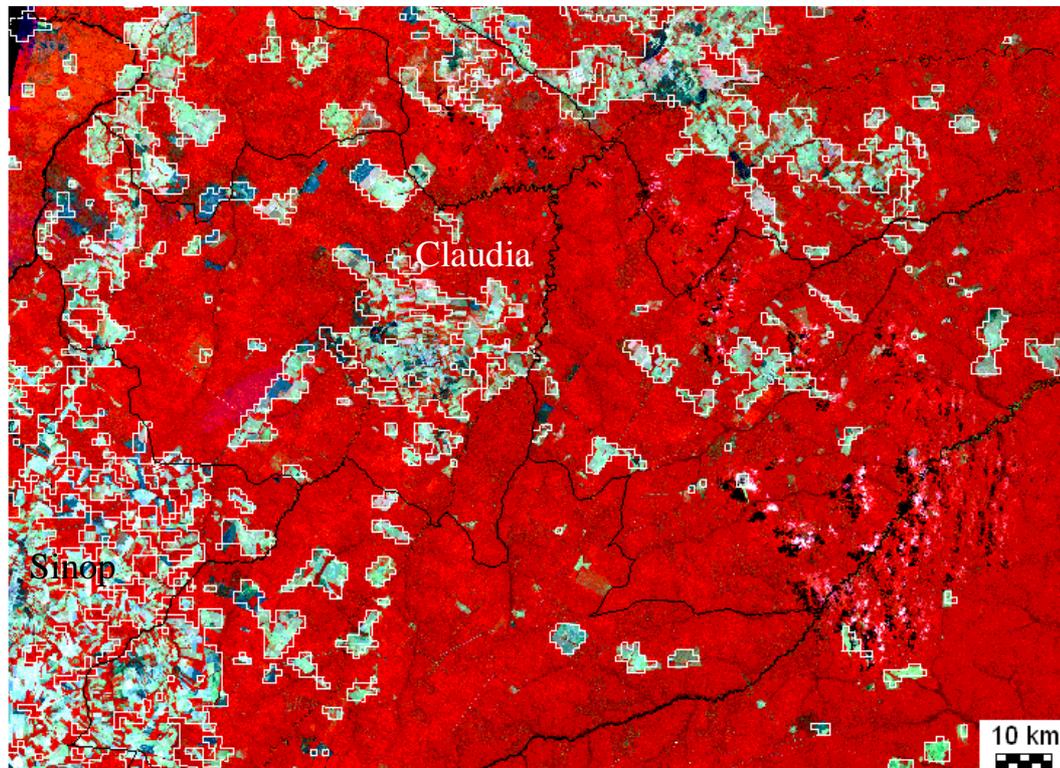


Figure 1.15 : Superposition des limites des aires déboisées obtenues par SPOT-VGT (en blanc) sur une image Landsat-ETM+ dans la région de Claudia en août 1999

Beaucoup d'auteurs utilisent généralement la méthode dite des vecteurs de changement (Lambin & Strahler, 1994) qui permet d'observer et quantifier la magnitude des changements d'occupation du sol et/ou l'impact de conditions climatiques particulières (hot-spots) ; cette technique nécessite une interprétation a posteriori sur la direction et la nature du changement. Nous proposons une autre méthode qui demande à être affinée ; elle consiste à retenir sur chaque mois de septembre de l'année n (en général les défrichements sont concentrés sur la période juin-juillet-août et ralentissent avec le retour des pluies en septembre) les pixels remplissant les 2 critères suivants :

La baisse du NDVI SPOT-VGT est supérieure à 0,1 entre l'année n-1 et l'année n ; le seuil de 0,1 est empirique et supérieur à la variabilité interannuelle liée au climat en région forestière (mais pas dans les marécages du Pantanal ou les cerrados)

ET le NDVI de septembre de l'année n-1 est supérieur à 0,6 ; ce seuil est large et vise à éliminer ce qui n'est pas forêt pour éliminer les pixels non-forestiers pris en compte par le premier critère.

Les cartes de la figure 1.16 montrent l'évolution observée par cette méthode de 1998 à 2004 pour la moitié nord du Mato Grosso. La méthode est perfectible car des secteurs déboisés anormalement étendus apparaissent en vert dans le *município* de Comodoro ainsi qu'à la limite nord-ouest du Mato-Grosso (cerrado) et à l'extrême nord le long de la BR-163 dans l'Etat du Para ; la mauvaise qualité des images SPOT-VGT de 1998 peut aussi être à l'origine de ces erreurs. Pour le reste, l'interprétation des images montre la continuité du mouvement de déforestation dans cette région de l'Amazonie méridionale, mouvement qui semble bien loin de s'essouffler sur les quatre dernières années. On peut aussi remarquer que les défrichements tendent à se concentrer depuis 2003 sur les *municípios* du centre du Mato Grosso à une centaine de kilomètres de la BR-163. Ceci tendrait à montrer que la dynamique récente est moins due à l'expansion du front de l'élevage et de la petite agriculture vers l'extrême nord que liée à l'expansion du modèle du soja à partir des *municípios* « modèles » de Sorriso, Sinop, Campo Novo dos Parecis ou Lucas do Rio Verde. L'image de 2003-2004 souligne ainsi la plus forte activité de déforestation incontestablement liée à la dynamique des sojiculteurs dans les *municípios* de Tapurah, Santa Carmem, Nova Ubiratan, Feliz Natal, Querencia, Brasnorte, Nova Maringa, etc... Le suivi du front pionnier par une autre méthode, celle de la détection des feux, va permettre de préciser cette constatation.



Photo 1.2 : Au milieu de la forêt, entre Ipiranga do Norte et Ipiranga, l'annonce de futures installations de stockage de grains d'une grande multinationale (V.Dubreuil, avril 2005)

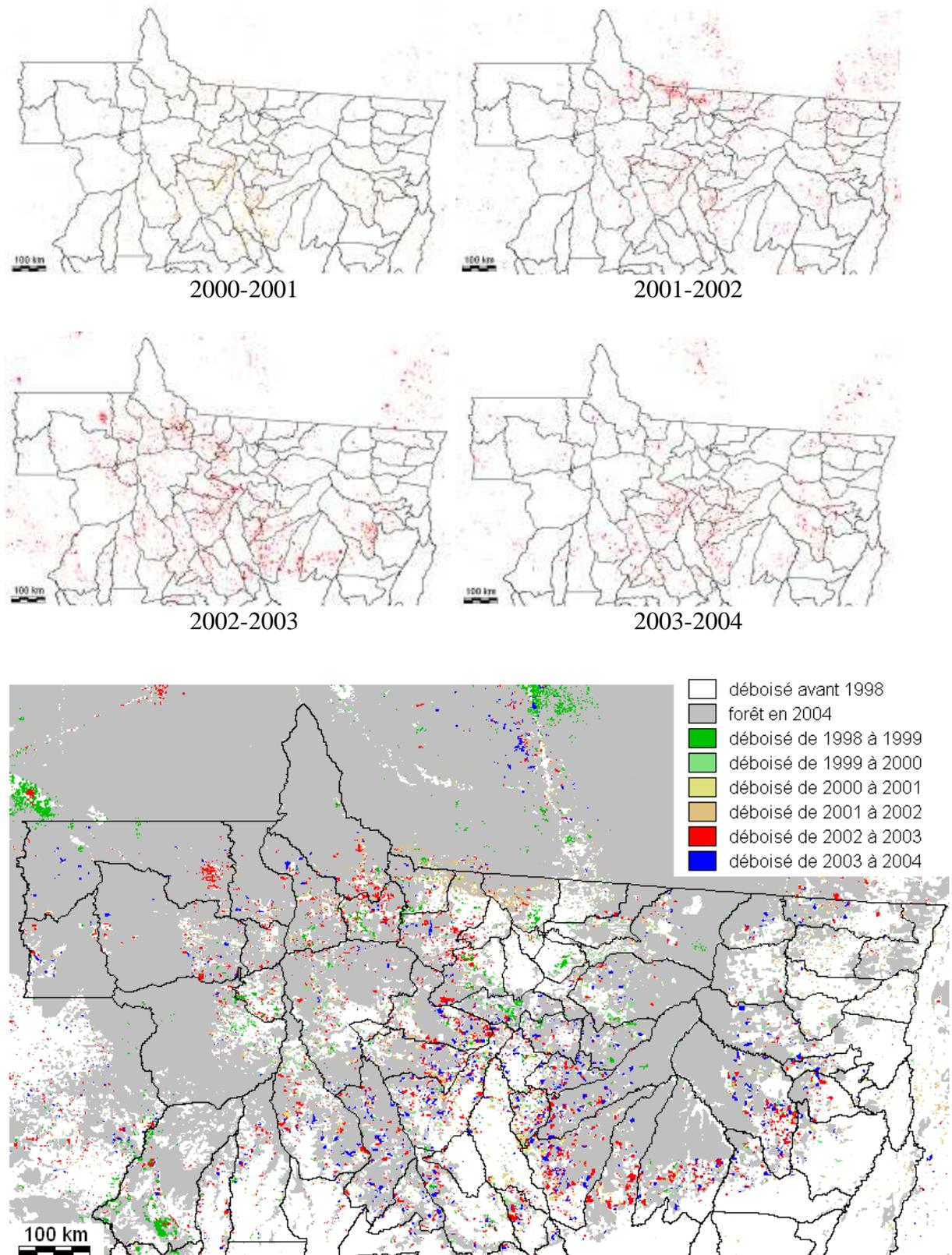
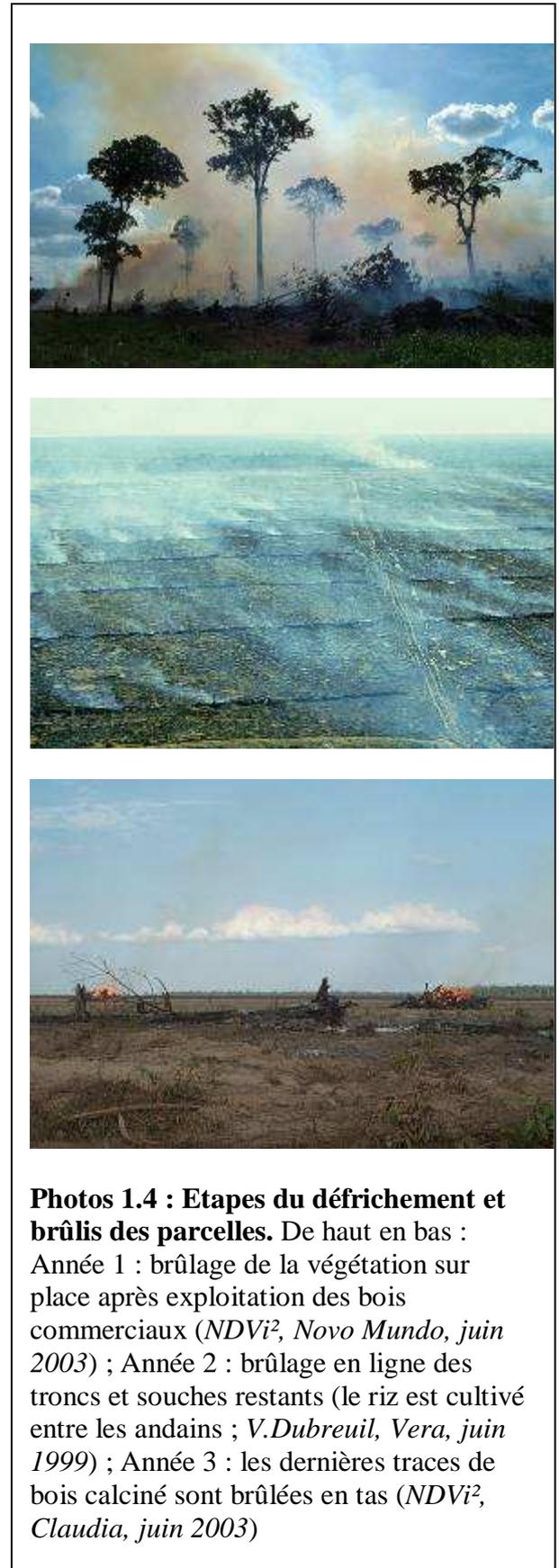


Figure n°1.16 : Suivi annuel de la déforestation par imagerie SPOT Végétation
 En haut : images annuelles ; en bas : synthèse 1998-2004



115- Le problème des feux et de leur suivi par télédétection

« La boîte d'allumettes, instrument de culture favori du cultivateur brésilien..., n'a jamais été aussi active » (Monbeig, 1952)

Une des manifestations les plus spectaculaires de l'avancée du front pionnier est le développement des feux pendant la saison sèche (Alencar et al., 2004 ; Barbosa et al., 2003 ; Metzger, 2002). Cependant, les feux observés, de l'espace ou sur le terrain, ne traduisent pas uniquement le brûlage de la forêt mais peuvent aussi résulter des pratiques agricoles car la pratique du brûlis reste très répandue dans le Mato Grosso. L'augmentation de la valeur nutritive des fourrages est la principale raison qui pousse les agriculteurs à brûler leurs parcelles. Le feu élimine certains nuisibles ainsi qu'une partie de la biomasse de basse valeur nutritive. Les cendres constituent une source essentielle de nutriments comme le calcium, le potassium et le magnésium. Cette agriculture sur brûlis, rentable vu son faible coût, reste donc très largement utilisée dans le monde où on estime qu'elle est pratiquée par plus de 250 millions de personnes sur près de 30% des surfaces cultivées ; pour la seule Amazonie brésilienne, cette technique serait utilisée par environ 500000 propriétaires (Metzger, 2001). Le feu est également fréquemment utilisé pour nettoyer les parcelles après certaines cultures (coton) et pour la récolte de la canne à sucre. Une part importante des feux observés correspond à des incendies (parfois intentionnellement) mal maîtrisés et qui touchent les parcelles de cultures ou de forêts voisines de la parcelle à traiter : ce phénomène est assez fréquent lors des tentatives de limitations du recru forestier (capoeira). Beaucoup de colons prennent cependant en compte la direction dominante du vent pour mettre en valeur leur lot « contre le vent » afin d'éviter la propagation du feu dans la forêt (Metzger, 2001). Si l'emploi du feu présente certains avantages agronomiques, en revanche les incendies pendant la saison sèche provoquent l'émission de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O , CH_4 , O_3 ou CO). L'importance de ces fumées est telle qu'elle contraint aussi parfois à fermer les aéroports et provoque de graves problèmes respiratoires dans les régions concernées. Enfin, les facteurs climatiques peuvent favoriser l'extension et la multiplication des feux comme lors de la forte saison sèche de 2001.

Pour lutter contre la pratique abusive de ces feux, la législation fédérale ne manque pas : le décret n° 2.661 du 08 juillet 1998 et l'article 27 de la Loi n° 4.771 du 15 septembre 1965, traitent spécifiquement de l'emploi et de l'utilisation du feu. Dans la Loi 9.605, du 12 février 1998 (Loi des "crimes environnementaux"), l'article 41 prévoit de "deux à quatre années de prison pour le fait de mettre le feu à une forêt". L'article 42 prévoit "*de un à trois ans d'emprisonnement pour la fabrication, la vente, le transport d'éléments susceptibles de mettre le feu à la forêt à partir des zones urbaines ou de tout établissement humain*". L'inefficacité de la politique gouvernementale fut manifeste pendant les grands incendies de 1998, et les pouvoirs publics ne réagirent que sous la pression internationale qui dénonçait le désastre écologique. Le système de protection PREVFOGO (*Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais*) sous la responsabilité de l'IBAMA payait alors son manque de moyens financiers, matériels et humains. Ces incendies du Roraima d'avril 1998 incitèrent le gouvernement à mettre en place un nouveau programme : le PROARCO (*Programa Nacional de Prevenção e Controle às Queimadas e aos Incêndios Florestais no Arco do Desflorestamento*) qui prévoyait l'utilisation

d'images satellites pour la vigilance et la surveillance en temps réel... Les incendies qui suivirent dans les mois et les années suivantes montrèrent l'inefficacité de ce nouveau programme.

Le système de surveillance des feux a été mis en place dès 1995-1996 au Mato Grosso et systématisé avec l'utilisation d'images NOAA en 2000. Confié à la FEMA, le système de surveillance et d'autorisation (mené conjointement avec l'IBAMA) a également été accompagné d'une forte tentative de sensibilisation des agriculteurs. Sur le terrain, les acteurs locaux privilégient des systèmes de lutte et de prévention plus classiques : pare-feux d'une largeur de 5 à 50 mètres, emploi contrôlé du procédé de contre-feux... L'éducation environnementale a, là aussi, encore beaucoup à faire.

Au niveau fédéral, c'est l'INPE qui a été chargé en 1987 de suivre ce phénomène, là aussi en utilisant les données fournies par les satellites NOAA. Il s'agissait de disposer au niveau du Brésil d'un jeu de données plus précis que les synthèses GAC (Global Area Coverage) disponibles depuis 1981 mais dont les limites en zone forestière avaient été démontrées (Belward & al., 1994). La méthodologie est fondée sur le fait que la plupart des corps situés à la surface de la Terre ont des températures de l'ordre de 300-320°K alors que la température des surfaces en feu atteint le plus souvent 1000 à 1300°K en secteur forestier et de 800 à 1200°K dans les cerrados. Ces températures entraînent un maximum d'émission énergétique dans la bande 2,7-3,7 μm (Pereira & Alfredo, 1997) comme le montre la figure 1.17. La température très élevée des surfaces en feu provoque une saturation des valeurs des pixels observées dans le canal 3 de NOAA : non prévu au départ pour ce type d'observation, le canal 3 de NOAA correspond à une partie du spectre électromagnétique où, pendant la journée, énergie émise par la surface en fonction de sa température et énergie solaire réfléchi par cette même surface se combinent. En fait, même des surfaces en feu réduites (de l'ordre de 30 mètres) suffisent à provoquer la saturation du canal 3 de NOAA, ce qui rend ce canal particulièrement sensible à la détection de ce phénomène.

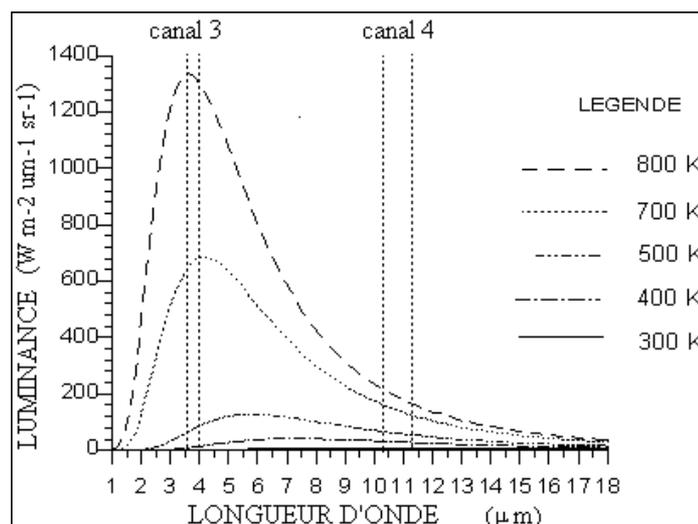


Figure n°1.17: Luminance spectrale en fonction de la température des surfaces et la longueur d'onde pour les canaux 3 et 4 de AVHRR

L'image de la figure 1.18 permet de localiser les pixels saturés dans le canal 3 le 10 juillet 1997 dans le centre nord du Mato Grosso. On voit l'importance de la pratique des feux dans les régions de cerrado (Coutinho, 1990) comme au sud de Sinop ou dans

la Chapada dos Parecis : dans cette dernière région (*municípios* de Tangara da Serra, Sapezal...) il est possible que de vastes parcelles de sol nu atteignent en cours de journée des températures de surface suffisamment élevées (typiquement plus de 47°C) pour provoquer également une saturation dans le canal 3 de NOAA (Pereira & Setzer, 1996). Ainsi, « si un feu couvrant d'une température de 500°K et ne couvrant que 1/1000^e du pixel AVHRR provoque la saturation du signal, on peut s'attendre qu'un sol nu et sec à une température de surface de l'ordre de 320°K, chose courante en début d'après midi en zone soudanienne, puisse aussi provoquer la saturation du signal si l'entièreté du pixel AVHRR correspond à cet état de surface » (Grégoire et al., 1993). Certains auteurs ont proposé des méthodes contextuelles de détection (Flasse & Ceccato, 1996) ou encore des méthodes combinant les canaux 3 et 4, d'une part pour réduire les ambiguïtés d'interprétation, mais aussi pour mieux estimer les surfaces réellement concernées par les feux (Chuvieco & Martin, 1994). Enfin, d'autres produits satellitaires sont également disponibles (GOES, DMSP-OLS, MODIS, ASTER) mais que pour ces dernières années (Maggi & Stroppiana, 2002). Dans la pratique, l'ancienneté des séries AVHRR, la simplicité et la robustesse de la méthode de détection de la saturation du canal 3 en font un produit toujours largement utilisé.

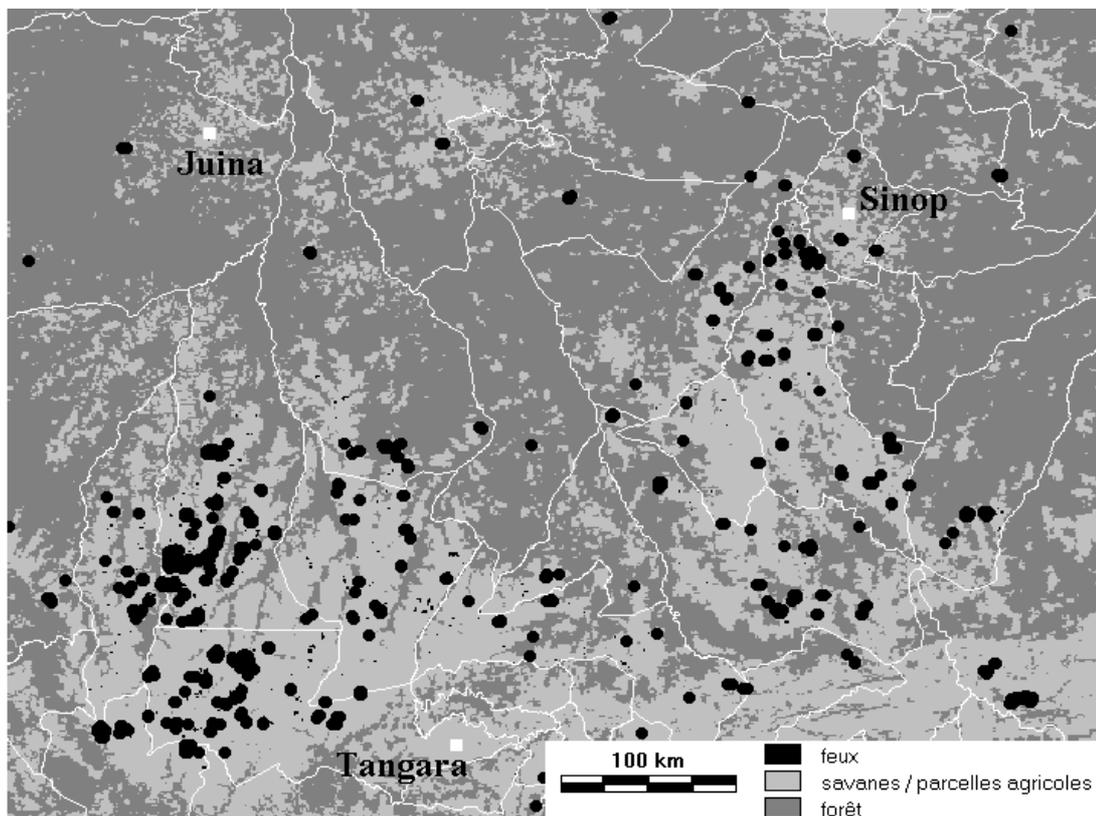
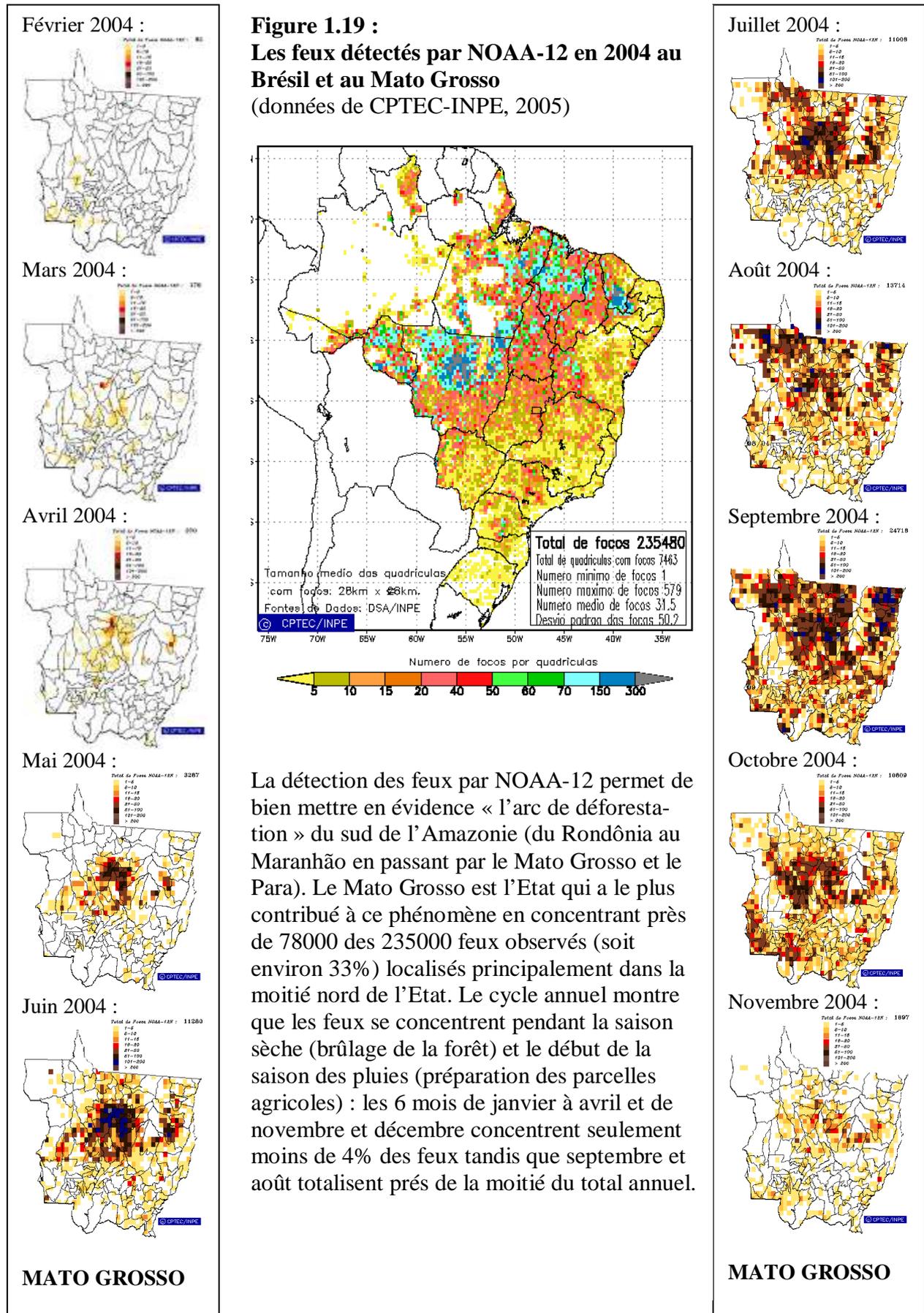


Figure 1.18 : Saturation du canal 3 sur l'image NOAA-14 du 10 juillet 1997 : les pixels saturés sont indiqués en noir.

En 2000 le Mato Grosso a concentré 30% des feux détectés (20000 sur les 60000 observés) sur l'ensemble de l'Amazonie Légale et un quart de l'ensemble détecté sur tout le Brésil. Le nombre de feux détectés a atteint un niveau record en 2004 avec 235480 feux dont un tiers pour le seul Mato Grosso (figure 1.19). Au-delà de ces chiffres sur les feux et la déforestation, il faut maintenant s'interroger sur leurs causes.



La détection des feux par NOAA-12 permet de bien mettre en évidence « l'arc de déforestation » du sud de l'Amazonie (du Rondônia au Maranhão en passant par le Mato Grosso et le Para). Le Mato Grosso est l'Etat qui a le plus contribué à ce phénomène en concentrant près de 78000 des 235000 feux observés (soit environ 33%) localisés principalement dans la moitié nord de l'Etat. Le cycle annuel montre que les feux se concentrent pendant la saison sèche (brûlage de la forêt) et le début de la saison des pluies (préparation des parcelles agricoles) : les 6 mois de janvier à avril et de novembre et décembre concentrent seulement moins de 4% des feux tandis que septembre et août totalisent près de la moitié du total annuel.

1.2 – Des projets de colonisation aux pâturages

La dynamique de déforestation mise en évidence pose la question de ses causes et des acteurs concernés. Au Mato Grosso, la colonisation agricole a conduit à la mise en place d'une triple logique d'occupation et de production : celle des grandes fazendas d'élevage, celle des grandes et moyennes propriétés tournées vers l'agro-industrie et celle des petits producteurs familiaux en auto-subsistance. Ces derniers ont généralement été installés dans le cadre de projets de colonisation privés et publics. Bien souvent ces exploitations ont subi un processus de regroupement foncier et une réorientation vers l'élevage, c'est pourquoi nous avons choisi de les aborder ensemble dans ce paragraphe (le suivant sera consacré au modèle du soja). Les pâturages représentaient 43% de la superficie du Mato Grosso en 2001 (contre 7% pour les cultures et 43% pour la végétation « naturelle »). De 1973 à 2001 le cheptel bovin est passé de 11,7 à 20,2 millions de têtes. En préalable, nous présentons la manière dont nous avons conduit nos travaux de terrain depuis 1999.

121- missions et travaux de terrain à l'échelle régionale

Pour aborder l'étude de vastes espaces comme le Mato Grosso (plus de 900000 km² soit 1,6 fois la France) il est commode de faire porter l'analyse sur des données statistiques agrégées au niveau des entités administratives. De ce point de vue, le Brésil, avec son habitude de disposer de données chiffrées sur tout le territoire fédéral à l'échelle municipale, fait figure de « paradis » pour les amateurs de statistiques : « *si Dieu est brésilien, on peut soutenir que le Brésil est par ailleurs le paradis des cartographes* » (Théry & de Mello, 2003). Pour intéressante (et indispensable) qu'elle soit, cette méthode de travail comporte des limites : d'une part, la taille inégale des entités en surface comme en poids démographique peut biaiser les interprétations, d'autre part, et surtout, elle occulte souvent une réalité vécue sur le terrain par les populations, la « froideur des chiffres » effaçant le quotidien des habitants. A la limite, aucun investissement de terrain n'est réellement indispensable dans ce cas, ce qui, compte tenu de la richesse des contacts que l'on peut établir avec les populations locales et de l'importance de percevoir in-situ les conditions de vie des colons peut paraître fortement préjudiciable à l'analyse scientifique.

L'utilisation des données de télédétection pourrait ne pas être guère meilleure si elle était pratiquée dans ces mêmes conditions. « *L'exploitation automatique aboutit aux plus graves erreurs, quand on ne dispose pas d'une bonne connaissance préalable du terrain, pour choisir des cibles d'entraînement sur lesquelles doit s'appuyer une itération dialectique permanente traitement + interprétation/terrain* » (Tricart, 1992). Cependant, là aussi l'importance du terrain à couvrir pose problème : certes, une scène NOAA ou une vingtaine de scènes Landsat-TM permettent de couvrir l'ensemble de l'espace concerné et d'en avoir une bonne vue d'ensemble. Mais le risque est grand de ne disposer que d'un « survol » partiel, le choix d'un nombre limité de secteurs de contrôles pouvant laisser de côté des régions ou des phénomènes particuliers.

Nous avons donc essayé de mettre au point au cours des 5 dernières années une méthode de travail sur le terrain qui concilie les objectifs (contradictaires) suivants :

- disposer d'une vision la plus exhaustive possible de l'ensemble de l'Etat, ce qui suppose un séjour même bref dans chacun des *municípios* et dans tous les grands types de paysages (« naturels » ou agricoles) de la moitié nord de l'Etat.
- Disposer d'une grande variété d'études approfondies des formes de la colonisation agricole : publique, privée, spontanée, en région de forêts comme de cerrado, en région de grande culture, d'élevage extensif ou de petite polyculture familiale.
- Disposer de données climatiques, point qui sera abordé dans les 2^e et 3^e parties.

Pour remplir ces objectifs, les données satellitaires Landsat ont été privilégié : elles ont permis de sélectionner a priori des itinéraires suffisamment variés et représentatifs (avec lesquels l'état des pistes nous a souvent obligé à composer...). Ces images ont guidé le choix (voire simplement permis de localiser ce qui n'existait sur aucune carte) des programmes de colonisation, des *assentamentos*, des fazendas, des secteurs divers... et le chemin pour y parvenir (photos 1.5). Des phénomènes impossibles à interpréter sur les images nous ont aussi amené à faire des détours pour satisfaire notre curiosité : ainsi, en 2001, intrigués par l'aspect géométrique d'un groupe de parcelles géométriques en pleine forêt au sud de Querencia, nous avons modifié notre itinéraire pour lever cette incertitude (figure 1.20 et photos 1.6 et 1.7).

Pour mener à bien ces missions, nous avons utilisé les fonctionnalités du système couplé Idrisi-GPS qui, pour peu que l'on dispose d'une image géoréférencée et compatible GPS, nous permettait sur le terrain à tout moment de pouvoir nous localiser directement sur l'image satellite (à condition que ni le GPS ni le portable ne soit à court de batterie !). Ce système permet également de prendre en note en format vectoriel sous idrisi des commentaires sur le type d'occupation du sol observé de part et d'autre de la piste (figure 1.21) : ce système de prise de note « à la volée » directement sur l'image permet de consigner rapidement toutes sortes d'informations (types de cultures, numéros des *sítios* ou noms des fazendas, état du pâturage, localisation d'une photo, etc...) et de couvrir un espace assez vaste à partir des pistes plus ou moins accessibles (photo 1.9).

A



B



C

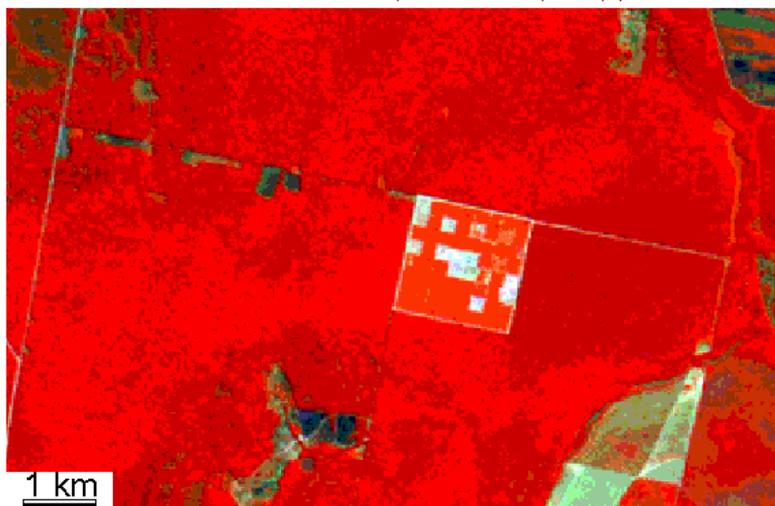


Photos 1.5 : Sur les pistes du Mato Grosso.

A : traversée du bac sur le rio Juruena à Cotriguaçu (NDVi², juin 2002). B : pont sur rio Ingorana, Nova Monte Verde (NDVi², juin 2002). C : rencontre avec une boiada sur la BR-80 à l'est de Peixoto de Azevedo (NDVi², juin 2003)

Figure 1.20 : Une forme « étrange » au milieu de la forêt : la fazenda Cumburiu

LANDSAT-7 TM : 224-69 ; 21 août 1999 , CC 4,5,3



Située à une quarantaine de kilomètres au sud de la ville de Querencia, la fazenda Cumburiu est en fait une aire de production de latex : l'isolement dans la forêt vise à éviter les maladies des hévéas, fréquentes dans le sud de l'Etat. 12 familles (pour l'essentiel des gens originaires du Nordeste mais qui étaient déjà installés dans le Mato Grosso avant d'être ici) vivaient en 2001 dans cette exploitation dont la structure parcellaire de 64 carrés de 200x200m apparaît clairement sur l'image Landsat (et nous a attiré !). La partie centrale, regroupe les maisons des ouvriers et celle du propriétaire (résident à Goiania et absent lors de notre passage). Les 90000 pieds d'hévéa (photo 1.7) ont été plantés au milieu des années 80 et produisaient 28 à 30 tonnes de borracha par mois en 2001. Les ouvriers, payés au système du pourcentage, nous ont confié être plutôt satisfaits de leur sort bien qu'éloignés de tout : certains d'entre eux affirmaient gagner près du double de ce qu'ils touchaient auparavant dans une grande plantation du sud du Mato Grosso.



Photo 1.6 : fazenda Cumburiu

Au centre de la clairière principale du centre de la fazenda, s'alignent les maisons des ouvriers (entre la plantation et le terrain de football !). La maison du gérant est un peu à l'écart.

NDVI², 27 mai 2001



Photo 1.7 : saignée d'hévéa à la fazenda Cumburiu

NDVI², 27 mai 2001

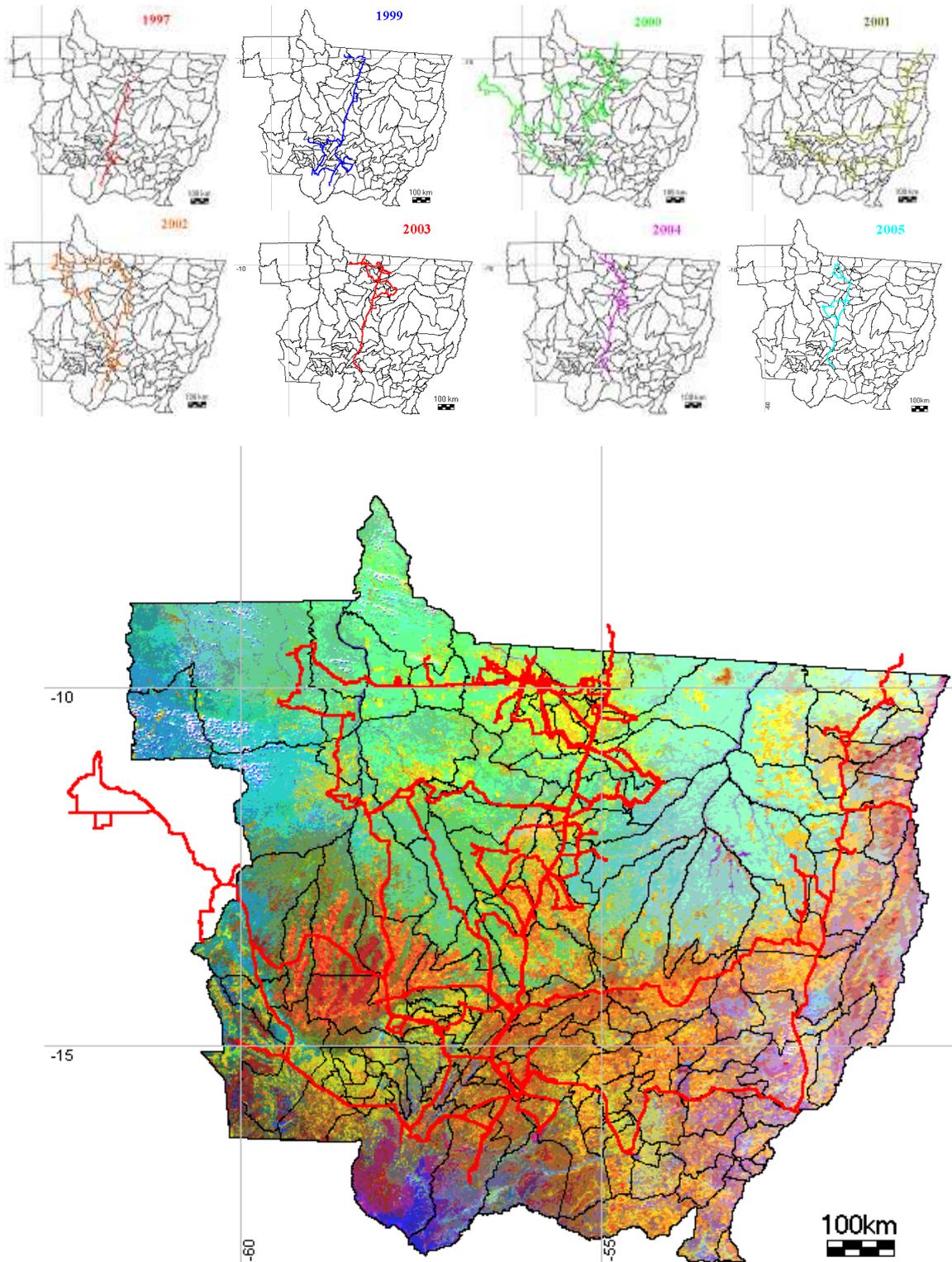
Au total, ce sont 8 missions successives qui ont été réalisées entre 1997 et 2005 (figure 1.22). Les deux premières, en 1997 et 1999 sont davantage des « découvertes » pendant lesquelles nous étions pilotés par nos partenaires brésiliens (et sans disposer encore des images Landsat couplées au GPS).



Photo 1.8 : Interview d'une famille dans un sitio de l'assentamento Caete (município de Diamantino)

NDVI², mai 2001

Figure 1.22 : Les missions de terrain réalisées au Mato de 1997 à 2005



En rouge, le récapitulatif de tous les kilomètres parcourus au Mato Grosso de 1997 à 2005 (sur fond d'image NOAA de 1997).

122- Les phases de la mise en valeur matogrossense : la « frontière du bois et des pâturages »

Il ne s'agit pas ici de reprendre dans le détail l'historique de la colonisation et du développement du Mato Grosso qui a largement été présentée dans l'ouvrage « Environnement et télédétection au Brésil » (2002) que j'ai dirigé. Nous rappellerons simplement les principales étapes, nécessaires à la compréhension des dynamiques spatiales et des paysages observables actuellement dans cet Etat, comment peut-on expliquer les évolutions rapides et diversifiées de cette partie du front pionnier et quels sont les facteurs les plus déterminants de la diversification régionale dans un contexte de puissants flux de migrations ? Enfin, plutôt que de reprendre de manière générale l'expansion du front pionnier nous l'illustrerons à partir des exemples de *municípios* particulièrement démonstratifs et visités à plusieurs reprises lors de nos missions de terrain : Colider et Itauba pour le développement des projets d'élevage (Walker et al., 2000) et d'exploitation du bois, Peixoto de Azevedo et Alta Floresta pour les problèmes liés aux activités minières (garimpos), la section suivante étant spécifiquement consacrée au développement de la grande culture dans la Chapada dos Parecis.

Le município de Colider est un bon exemple des difficultés et des avatars de la colonisation agricole matogrossense. Le territoire de l'actuel *município* de Colider, comme l'ensemble de la vallée du Rio Peixoto de Azevedo, est, jusqu'en 1970, peuplé exclusivement par les populations indigènes, principalement issues de la tribu Kreen Akarôre. Leur existence est confirmée par des survols de la région organisés en 1950. Par la suite, diverses expéditions dont celles des frères Orlando et Cláudio Vilas Boas (1968), communiquent avec ces populations. En 1972, les troupes du 9ème BEC atteignent le Km 615 de la route Cuiabá-Santarém, qui correspond à l'entrée de la Gleba Cafezal acquise par Raimundo Costa Filho, président de la Colonizadora e Imobiliária Líder S/A. Fort d'une expérience dans le nord de l'Etat du Paraná et dans l'ouest du Mato Grosso (Vale do Guaporé), Raimundo Costa Filho profite de la politique favorable aux entreprises de colonisation (Castro et al., 1990) pour créer la Colonizadora Líder et acquérir des terres qu'il regroupera sous le nom de « Gleba Cafezal ». Ce processus est la règle dominante dans cet Etat : « selon l'INCRA il y avait vers la fin des années 80 environ 50 entreprises privées de colonisation au MT qui ont vendu plus de 3 millions d'hectares correspondant à peu près à 20000 parcelles individuelles » (Durieux, 2002). La superficie des terres de la Líder varie selon les sources de 300000ha (terres dont R. Costa Filho se dit propriétaire) à 20000ha correspondants aux lots Dourados et Maringá enregistrés auprès de l'INCRA. Créé en 1970, l'INCRA (Institut National de la Colonisation et de la Réforme Agraire) consacre l'évolution de la politique en faveur de la conquête de nouvelles terres (notamment dans la ligne du Plan d'Intégration Nationale de 1970) aux dépens d'une véritable réforme agraire (l'INCRA succède en effet à l'IBRA, Institut Brésilien de la Réforme Agraire, né de la loi sur le « Statut de la Terre » de novembre 1964). L'INCRA lance en 1971 le programme de redistribution des terres (PROTERRA) et d'aide à l'agriculture du Nord et du Nordeste : en fait, « fin 1976, l'installation de familles sur des terres effectivement expropriées est pratiquement nulle » (Bret, 1977).

La Gleba Cafezal est ainsi inaugurée le 7 mai 1973. 42km à l'ouest de la BR, une clairière est ouverte, le noyau urbain n'est encore constitué que de quelques baraques mais porte déjà un nom : Cafelândia. L'objectif est de développer dans la région une

vaste aire de production de café en attirant des populations du sud du Brésil (dont des producteurs de café du Parana) en proie à de nombreuses difficultés : « *Le 17 juillet 1975 ont eu lieu les gelées les plus graves le Brésil du Sud ait connu depuis un demi-siècle (...) les trois quarts des plants de café ont été touchés à des degrés divers (...). Dans le Parana, la totalité des plants de café a été atteinte. (...) A la bourse de Londres la tonne de café est passé de moins de 500 livres sterlings à la veille des gelées à 4260 livres le 15 mars 1977* » (Bret, 1977). Un an après son inauguration, la Gleba est élevée au rang de district (officialisé par un décret en 1976), dont le siège est Cafelândia qui, le 7 mai 1974, devient Colíder, contraction des termes Colonizadora Líder. La Líder vend des lots de toutes tailles (de 2 à plusieurs centaines d'*alqueires*, l'équivalent de 2,42 hectares) ne respectant pas les directives de l'INCRA qui stipulent que les lots ruraux vendus aux colons doivent être d'une taille minimale de 100ha (42 *alqueires*). Ainsi, les *chácaras* destinées aux habitations résidentielles et aux productions horticoles et maraîchères ne dépassent pas les 10 ha, les lots ruraux avoisinent les 50ha et les lots urbains mesurent 480 ou 600m². De ce fait, le titre de colonisation délivré à la Colonizadora Líder par l'INCRA est cassé à la fin de l'année 1974. La Líder commence également à vendre des lots situés dans la Gleba Teles Pires c'est à dire en dehors des limites officielles des 20000ha achetés et répertoriés auprès de l'INCRA. Ainsi de nombreuses propriétés sont achetées à la Líder alors qu'elles appartiennent en réalité à l'Etat... Les colons achètent leur terre en payant comptant 50% de la valeur totale, le reste pouvant être versé en 3 fois ; ils reçoivent ainsi un contrat dit «de compra e venda». Malheureusement, les titres de propriété définitifs ne sont ensuite pas validés par l'INCRA car la taille des lots ne correspond pas aux normes requises par l'organisme et surtout parce que la Colonizadora n'est pas en règle (titre de colonisation cassé et impôts impayés). La Líder refuse tout compromis et en 1982, elle est désappropriée de ses 20000 ha par le décret n° 87.157 du 06/05/82 publié au J.O. le 07/05/82. La majorité des colons restent sans titre de propriété. Des estimations recueillies sur le terrain indiquent qu'aujourd'hui plus de 1000 lots urbains et près de 4000 ha en zone rurale seraient sans écriture.

Durant les années 1990, de nombreux producteurs de Colíder se sont lancés dans la plantation du coton. Fortement soutenue, cette culture connaît un essor important ; la superficie plantée maximale est atteinte en 1993 avec près de 15000 ha. Une coopérative chargée de la vente et du stockage et de la mise en balle est créée. L'Algolíder achète les productions de Colíder mais aussi des *municípios* voisins (Terra Nova do Norte, Nova Canaã do Norte...). A la fin des années 1990, le soutien à cette production s'arrête, la coopérative ferme ses portes, c'est la fin de l'aventure du coton dans la région. Aujourd'hui l'agriculture est toujours faiblement représentée. Sur les terres mécanisées où l'on produisait du coton, des plantations de soja sont tentées en 1999 et 2000 mais face aux difficultés de récolte, de commercialisation... et également au manque d'aptitude des producteurs, la tentative avorte rapidement. Par ailleurs, certaines zones du *município* sont légèrement ondulées (photos 1.10) ce qui empêche une mécanisation des parcelles.



Photos 1.10 : Paysages de pâturages dans la région de Colíder le long de la BR-163.
(NDVi², juin 2002)

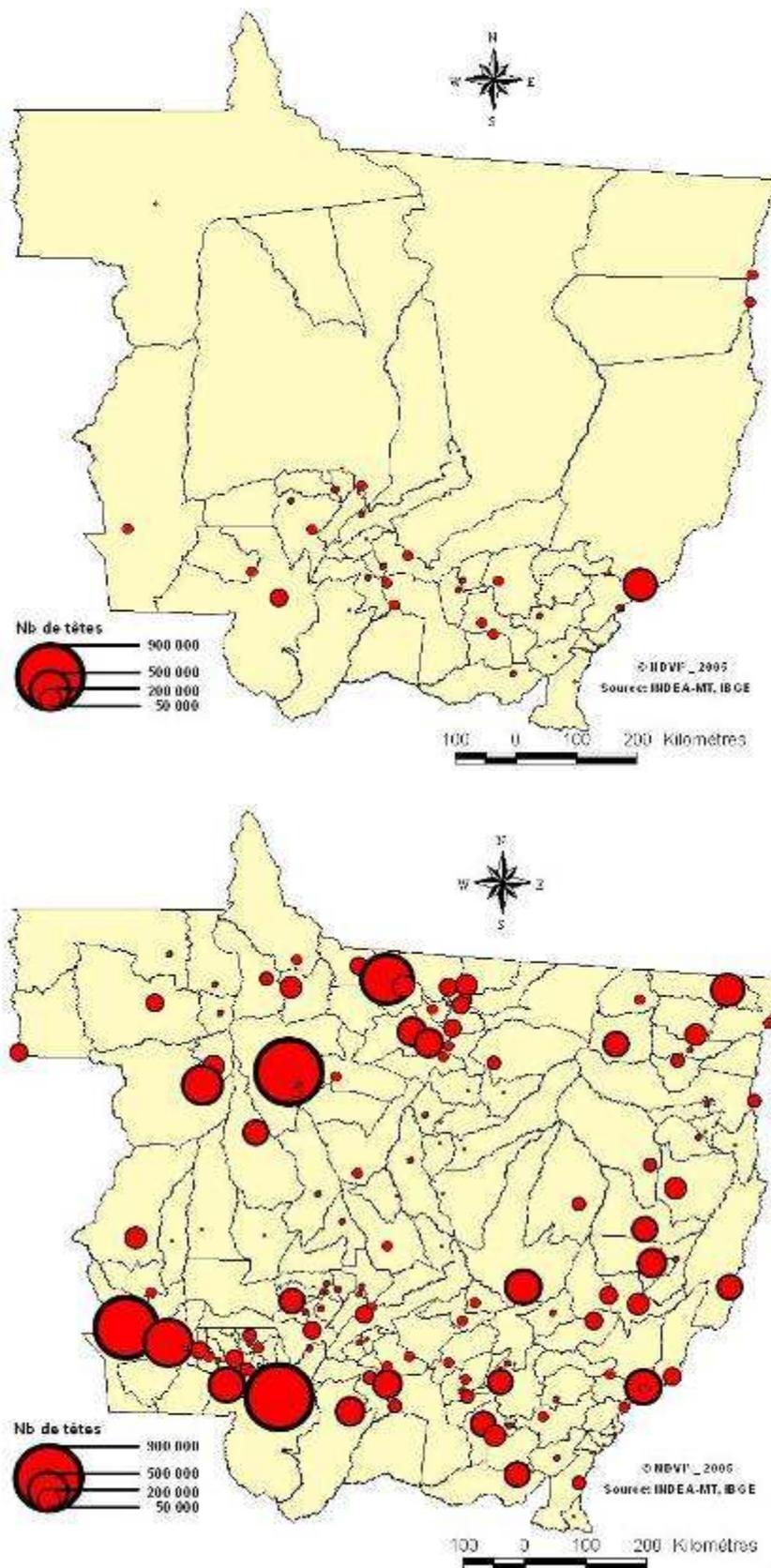


Figure 1.23 : Evolution du cheptel bovin au Mato Grosso de 1977 (en haut) à 2003 (en bas). Remarque : les têtes de bétail sont comptabilisées au siège du município !

L'activité dominante est donc l'élevage qui a aussi profité de la désaffectation des terres agricoles par les colons ayant préféré tenter leur chance dans les mines. L'essentiel du *município* est couvert par des pâturages formés initialement par la Humendícula et la Colônia auxquelles se substitue progressivement la Brizanthã dont la résistance et les performances nutritives semblent meilleures. Dans le nord du *município*, on peut observer une concentration des terres ; les lots initiaux de 100 ou 200 ha ont été regroupés pour former des fazendas de 1000 ha et plus. Avec plus de 350000 têtes de bétail destinées, à plus de 90% à l'élevage d'embouche, Colíder possède le deuxième plus gros troupeau bovin du centre nord du Mato Grosso (derrière Alta Floresta ; figure 1.23). L'essentiel de l'activité municipale se concentre autour de l'élevage avec la production de viande et, plus récemment, de lait (Carvalho & Tourrand, 2000).

La **laiterie** Primo Indústria de Laticínios Ltda s'est implantée en juillet 2003 reprenant une activité déjà présente sur le *município* (ancien propriétaire : groupe Machado). Se basant sur une étude de marché et sur potentiel laitier de la région, le groupe a décidé de s'implanter à Colíder. La capacité du bassin laitier touché par la laiterie atteint actuellement 250000l/j en période des pluies mais le potentiel estimé est proche de 400000l/j. Le groupe organise le ramassage du lait sur le *município* et les *municípios* voisins. Il se repose sur un réseau de tanks frigorifiques : communauté Ouro Branco XII (Nova Canaã), capacité 6000l (remplissage actuel 2500l), Alta Floresta capacité 20 000l Novo Mundo, capacité 10 000l (remplissage actuel 2000l) et Nova Guarita capacité 20 000l (en construction) où la collecte est assurée tous les deux jours. Sur Colíder, Carlinda, Nova Santa Helena et Terra Nova, le ramassage est quotidien. La production de mozzarella ou de lait pasteurisé est vendu sur le marché pauliste (70%), brasiliense, goiano. Les coûts du fret sont compris entre 300 et 350 R\$/ton. Outre la laiterie, le *município* dispose d'un **abattoir** frigorifique (CVR Agroindustrial Ltda) propriété du groupe Quatro Marcos. D'une capacité de 600 bêtes/j, l'entreprise emploie entre 400 et 500 personnes. Jusqu'à une distance de 150 km, le groupe se déplace gratuitement pour chercher le bétail, au-delà le fret, tertiarisé, est déduit lors de l'achat du bétail au propriétaire. L'essentiel du marché de consommation se situe dans le sud est du pays. Les centrales d'achats des supermarchés de l'Etat de São Paulo (Atacadão, Carrefour, Makro, Pão de açúcar...) et les grossistes de l'Etat de Rio sont les principaux acheteurs de la viande produite. La part des exportations est réduite à 15%. Elles concernent le Moyen Orient (abats) et le Chili (viande congelée désossée) essentiellement. Pour São Paulo, le coût du fret atteint 250 R\$ et 280 R\$ pour Rio. Au début des années 1990, la piste menant à Alta Floresta est asphaltée et le pont en béton traversant le Teles Pires, construit. Les liaisons entre les deux villes sont plus importantes et la MT 320 devient l'axe préférentiel du trafic de la région aux dépends de la MT 208.

L'exemple d'Itaúba, *município* voisin de Colíder, permet de comprendre comment un schéma de colonisation différent a également conduit à l'essor des pâturages. Le *município* d'Itaúba doit son nom à l'arbre (*Mezilaurus itaúba*), soit «l'arbre de pierre» en langue Tupi. Le *município* marque, à plusieurs titres la limite entre le domaine équatorial amazonien, au nord, et le domaine de la forêt de transition, au sud. Dans le paysage le long de la BR-163 (photo 1.11), c'est d'abord le passage entre la forêt mésophile (omniprésente au sud dans la région de Sinop) et la forêt ombrophile amazonienne qui apparaît comme le caractère marquant. La ville d'Itaúba marque également la limite de la Chapada dos Parecis et ses grands plans monotones; plus au

nord, le relief est plus vallonné, avec un modelé typique de collines, la couverture est représentative du domaine équatorial.

Du point de vue de la colonisation agricole, on quitte également les grands projets de colonisation de la SINOP, de l'INDECO ou de la Líder. Ici, la colonisation a d'abord été marquée par le développement de l'exploitation du bois. Rapidement, l'élevage extensif a également été développé dans le cadre de grandes fazendas. Dans les années 50, les frères Spinelli explorent la région (alors occupée par les Indiens Kayabis) pour l'exploitation de la *borracha*. La politique de distribution des terres puis la spéculation foncière font que la propriété des terres change à plusieurs reprises jusqu'en 1973. A cette date, les frères Bedin (Ildo, Adelino et Ivo originaires de Abelardo Luz au Santa Catarina) rachètent, pour l'exploitation du bois, les terres correspondant à deux lots de 10000ha portant les noms de Trindade et Selvagem vendus par l'Etat du Mato Grosso à Benedito Andrade dans les années 1950. Les frères Bedin, forts d'une expérience dans le sud du pays (2 scieries dans la Paraná et le Santa Catarina), construisent à Itaúba la scierie IMAREL (*Indústrias de Madeiras Renato Limitada*, du nom du Rio Renato qui coule sur ces terres ; photo 1.12). La région est encore très peu explorée et de nombreux bois de valeur peuvent être exploités. La nécessité de faire venir une main d'œuvre (du sud du pays essentiellement) pour le travail dans les scieries et les fazendas est à l'origine de la localité d'Itaúba, ancien siège de la fazenda des Bedin. Dans les propriétés alentours (faz. Santo André notamment), la récolte de la sève d'hévéa est l'autre activité importante de la région. Devant les difficultés de transport et le coût de la production, la récolte de l'hévéa est abandonnée dès la fin des années 1970 et les fazendas se tournent vers l'élevage. (fazenda Santa Adelia, fazenda Fischer).

A la fin des années 1970, l'arrivée de colons se fait plus forte ; la ville d'Itaúba croît, accueillant essentiellement des populations du sud du Brésil : l'enquête menée en 1989 par le projet POLONOROESTE de la Banque Mondiale montre que dans le nord du Mato Grosso 71% des agriculteurs sont originaires des Etats du Sud dont 58% du total du seul Etat du Parana et seulement 2% des Etats du Nordeste (de Gouvello, 1996, 1999). Les frères Bedin ne veulent pas devenir une entreprise de colonisation, ils vendent simplement les baraques et quelques hectares aux fonctionnaires de la scierie. Sur les 20800ha, 426ha sont occupés par les industries et les résidences urbaines et 2300 sont destinés à la petite propriété (6 à 10 *alqueires*), le reste est en pâturage. Il s'agit pour l'essentiel des collines et terres situées autour de la ville. Des entreprises de colonisation privées comme la Líder, la Juruena, la Maiká... se chargent de vendre des lots aux migrants et d'organiser l'occupation de la région.



Photo 1.11 : Vue de la BR-163 à la hauteur de la ville d'Itaúba
(NDVi², juin 2002)



Photo 1.12 : Une des nombreuses scieries d'Itaúba (V.Dubreuil, juin 1997)

Le *município* d'Itaúba a toujours connu deux activités principales : l'extractivisme et l'élevage d'embouche. Les fonctionnaires des scieries, assurés d'un salaire correct mais sans terres, ne se sont pas dirigés vers l'agriculture. Les principaux défrichements dans le *município* sont l'œuvre de propriétaires originaires du sud du pays qui ont profité du coût très bas de la terre pour former des fazendas d'élevage de quelques centaines d'hectares. La région est riche en châtaigniers du Pará et les fruits constituent un complément de rente pour les petits propriétaires ou ouvriers.

L'activité liée à l'exploration du bois est cependant en déclin ces dernières années. Les Bedin ferment une des deux scieries en 1998 et vendent la seconde à la fin 2002. Symbolisant les nouvelles orientations voulues par les frères Bedin et les difficultés du secteur du bois, le groupe qui s'est initialement appelé IMAREL, puis Bedin Industria de Madeiras Ltda prend en 2001 le nom de Itaúba Agro-industrial S.A. (regroupant ainsi les entreprises Bedin Agro-Florestal Ltda. et Bedin agropecuária Ltda; l'entreprise Bedin Indústria de Madeiras Ltda. e Colonizadora étant purement et simplement supprimée). Débutant avec 25 employés, les scieries des Bedin faisaient travailler directement 250 personnes en 1994/95, mais seulement 100 à la fin 1999. A la fin 2002, la scierie des Bedin produit environ 700m³ de bois par mois. Cette production est principalement constituée de planches brutes ou travaillées pour l'industrie mobilière, de manches à balai (utilisation maximale de la matière première), plinthes... Les planches brutes destinées à la construction sont vendues à Porto Alegre (coût approximatif 4/4500R\$ de fret pour 25/27m³ de bois vert). Les planches destinées à l'industrie mobilière sont vendus à 80% sur le marché intérieur (intérieur de SP). Seulement 20% de la production est exportée (Espagne principalement) à partir du port de Paranaguá (PR) (coût approximatif 3500 R\$ de fret pour 35m³ de bois sec en 2003).

La seconde scierie importante sur le *município* est la scierie Itaúbassu Madereira Ltda du groupe DAL PAI S.A. déjà propriétaire de scieries à Cuiabá, Marcelândia (MT) mais aussi à Curitiba (SC). A Itaúba, l'entreprise emploie 250 ouvriers et produit environ 7000m³/mois. L'industrie du meuble est le client principal de la scierie. Pour 40%, les acheteurs se situent sur le marché intérieur (Rio, SP, PR, MG) et pour les autres 60%, à l'étranger. Accompagnant le front pionnier, le groupe a fermé la scierie de Cuiabá en 1993, puis celle de Marcelândia en 1995 pour ouvrir, en 2000, une unité à Moraes de Almeida (PA). Employant 200 personnes, cette scierie exporte 30% de sa production à partir des ports de Bélem et Santarém. Le reste est coupé sur place mais usiné à Itaúba. La scierie Itaúbassu possède plusieurs propriétés situées à proximité de la ville dans lesquelles elle pratique une gestion raisonnée des ressources forestières et une reforestation en «*pinho cuiabano*». La distance d'approvisionnement en bois est comprise entre 30 et 60km de la ville. Comme l'entreprise des frères Bedin, le groupe DAL PAI S.A. se diversifie aussi en pratiquant l'élevage d'embouche.

L'élevage est présent dans le *município* depuis une vingtaine d'années déjà. Les frères Bedin ont profité de l'exploitation forestière sur leur terre pour semer des pâturages. Sur le *município*, l'élevage est essentiellement un élevage d'embouche. La proximité des abattoirs frigorifiques (Colíder et Sinop) encourage cette orientation (Tourrand et al., 1999). Cependant, il devient nécessaire de renouveler les pâturages (Mitja & de Robert, 2003). C'est pour cette raison que les Bedin comme d'autres propriétaires éleveurs entrent progressivement dans l'agriculture. Depuis le milieu des années 1990, sur les terres les plus planes où le rendement des pâturages est faible, l'agriculture mécanisée

progressive. Le riz est la première culture. C'est en 1999 et en 2000 que les surfaces plantées en riz connaissent leur maximum. Depuis, elles sont en constante diminution au profit du soja. Les productions de riz sont vendues sur Colíder et à un moindre degré Sinop, le soja est exclusivement vendu et stocké à Sinop à travers les entreprises multinationales Bünge ou Cargill. Les éleveurs qui ont investi dans l'agriculture pour rénover les pâturages souhaitent dans l'ensemble continuer ce système bi-polaire. Ces choix sont soutenus par les institutions financières (Banco do Brasil, SICREDI) et parfois aussi par la SUDAM (Bedin, 1997 ; Pocard-Chapuis, 2002). Il faut noter également les tentatives de plantations de coton (quelques centaines d'hectares) qui se sont déroulées durant les années 1990 grâce au soutien du secrétariat à l'agriculture du Mato Grosso : sa culture trop coûteuse et trop difficile est progressivement abandonnée (1998). Dans les *municípios* voisins, la découverte de l'or va aussi être à l'origine de l'abandon des projets de développement agricoles.

123- L'essor et les difficultés posées par l'extraction aurifère

Les principaux gisements d'or exploités au Brésil sont situés dans la périphérie amazonienne (Becker, 2001) et notamment dans le Para : environ 10000 dans les années 60, la population des *garimpeiros* atteignait 240000 en 1990. Dans le Mato Grosso, l'activité récente s'est concentrée dans les régions de Colíder, Peixoto de Azevedo, Alta Floresta (y compris les *municípios* voisins de Novo Mundo, Paranaíta et Apiacas), Juruena. Souvent, cette activité d'orpaillage a sérieusement retardé, voire compromis, le développement des projets de colonisation agricole : cette activité offre « *un emploi alternatif aux populations en déplacement (et) agit comme une soupape de sécurité pour les tensions sociales* » (Becker, 2001). Davantage que les surfaces déboisées qui sont généralement de taille modeste (Polidori et al., 2001), d'un point de vue environnemental, cette exploitation pose surtout le problème de la pollution (dans l'eau et dans l'air) liée au mercure utilisé pour la précipitation des particules d'or. Après le début des programmes de colonisation lancés au début des années 1970, le Nord du Mato Grosso a été le siège d'une intense et éphémère fièvre aurifère : celle-ci a, non seulement complètement déstructuré les projets de mise en valeur agricole, mais aussi modifié les paysages comme l'illustrent les exemples d'Alta Floresta et Peixoto de Azevedo.



Photo 1.13 : Paysage du garimpo da cabeça, Alta Floresta (NDVi², juin 2002)



Photo 1.14 : Descente dans le puits du garimpo da cabeça: un câble métallique actionné par un moteur permet d'accéder au filon... 70 mètres plus bas ! (NDVi², juin 2002)



Photo 1.15 : Broyé puis tamisé, le minerai d'or est péniblement extrait après précipitation avec du mercure (NDVi², juin 2002)

Le *município* de Peixoto de Azevedo porte le nom du cours d'eau qui le traverse, un nom hérité d'une famille de l'oligarchie matogrossense de la fin du 19^{ème} siècle. La vallée de la rivière Peixoto de Azevedo était le territoire des Indiens Kreen Akrôre. Leur existence fut confirmée par le survol de leurs *aldéias* en 1950, un contact fut tenté en 1956 par l'Anglais Richard Manson mais cela lui a coûté la vie. A partir de 1968, les frères Vilas Boas sont parvenus à rencontrer les Panarás (autre nom des Indiens de la nation Kreen Akrôre). En janvier 1975, ces Indiens décimés par les luttes contre les colonisateurs ou les militaires furent obligés de migrer vers le Parc Indigène du Xingu.



Photo 1.16 : Arrivée à la ville de Peixoto par le sud et la BR-163 (NDVi², juin 2003)



Photo 1.17 : Paysage d'anciens garimpos dans la région de Peixoto : seuls subsistent des trous d'eau et des monticules de gravats... (NDVi², juin 2003)

La région de Peixoto fut vendue par l'Etat du Mato Grosso dès les années 1950 par le biais d'un contrat de prestations et services de colonisation privée signé avec l'Imobiliária Ipiranga de Boralli e Held. Le contrat, rédigé en novembre 1953, concerne une zone de 200 000ha appelée Gleba Cafeara où l'entreprise de colonisation s'engage à installer dans un délai de huit années maximum des familles sur des lots n'excédant pas 1000ha. Aucun mouvement de colonisation n'est amorcé. C'est seulement à partir de 1973 et l'ouverture par l'armée de la BR 163 que les premiers colons emmenés par la famille Belmonte de Barros (Orestes, Elias et Acilio) s'installent sur les berges du Rio Peixoto. Ils sont accompagnés d'un groupe de 18 propriétaires qui avaient acheté leur terre depuis 1965 (Ferreira, 2001). Défrichant les terres à proximité de la BR et de la rivière, ces colons, avec le soutien de l'armée, construisent les premiers bâtiments qui donneront naissance à la ville de Peixoto. La découverte d'or en 1979 entraîne l'arrivée massive d'orpailleurs venant aussi bien du Pará (populations nordestines émigrées le long de la Transamazonienne) que du sud du Mato Grosso (ouvriers journaliers dans les plantations de canne à sucre) mais aussi des colons présents sur place. Les hommes employés dans les mines assurent ainsi une activité et une subsistance à leurs épouses restées sur le lot. A l'image des *municípios* voisins, lors de la découverte des gisements d'or dans la région, les cultures sont progressivement abandonnées, les pâturages couvrent de plus en plus de parcelles. Cette invasion désordonnée des lots oblige l'INCRA à procéder à une régularisation foncière s'appuyant sur la Coopercava. La croissance de Peixoto est importante : en 1981, la bourgade est élevée au rang de district du *município* de Colíder et, en mai 1986, de *município* par suite du démembrement des *municípios* de Sinop et Colíder (loi 4.999).

Le *município* de Peixoto est vaste (plus de 14 300km²) mais seul l'ouest du *município* connaît une occupation importante. L'est est occupé par la réserve indigène Capoto-Jarina dont 80% des 635 000ha sont situés sur le territoire de Peixoto. Plus de 40% de la superficie totale du *município* correspond donc à des aires protégées. Les espaces, qui, à l'est, n'appartiennent pas au territoire indigène sont occupées par de grandes fazendas d'élevage. Ici, comme souvent en Amazonie, « la spéculation foncière et la captation de

ressources fédérales sont parmi les principaux moteurs de l'expansion du latifundium dans la région (...) les projets de développement agricole en Amazonie étant amenés à considérer l'espace forestier comme un bien gratuit, avec pour corollaire l'absence de véritables études d'impact tout comme d'études de rentabilité réalistes » (Fearnside, 1991 ; Walker et al., 2000). Comme dans l'Etat du Para, « les nombreuses aides de l'Etat (...) sont destinées à la destruction de la forêt et non à la mise en valeur des parcelles déboisées » (Tricart, 1992).

La partie occidentale est plus plane et est aussi la plus anciennement colonisée. Si les pâturages sont dominants, quelques propriétés situées en bordure de la BR 163 se destinent à l'agriculture mécanisée. Le riz est la culture la plus pratiquée. La commercialisation se faisait sur le marché local et sur Sinop. Depuis la récente poussée pionnière le long de la BR 163 dans le Pará, Castelo do Sonho et Novo Progresso sont aussi des marchés potentiels. Sur les terres les plus planes et les mieux préparées situées en bordure du *município* de Terra Nova do Norte, on note quelques tentatives de culture de soja initiées en 2001. Les rares producteurs de soja sont arrivés récemment dans la région et sont originaires du centre du Mato Grosso (Lucas et Sorriso). Les rendements sont assez moyens (40 à 45 sacs/ha) mais la difficulté majeure demeure les conditions climatiques lors de la récolte. Au milieu des années 1990, il faut noter quelques essais infructueux de la culture du coton rapidement abandonnée.

Enfin, à la suite de la fièvre aurifère qui fut à l'origine du véritable développement de Peixoto, de nombreux orpailleurs se sont retrouvés sans emploi et sans ressources. L'occupation illégale de terres a alors connu un essor notable. L'INCRA cherche à améliorer la situation en créant de nouveaux *assentamentos* sur les terres fédérales ou, en accord avec des propriétaires privés, en régularisant l'occupation illégale de terres (cas des terres de la Cachimbo). Peixoto est l'un des *municípios* matogrossenses ayant la plus grande superficie de terres d'assentamento.

- Aquarius, créé en 2002, 1 219ha, 25 familles
- BR 080, créé en 2002, 26 200ha, 250 familles
- Cachimbo 2 : créé en 2000, 49 000ha, 824 familles
- Padovani : créé en 1997, 30 000ha, 450 familles
- São Francisco do Jarina : créé en 2002, 17250 ha, 113 familles
- São José da União : créé en 1996, 60 000ha, 1000 familles
- Teodomiro F de Santos, créé en 2002, 21 275ha, 200 familles
- Cachimbo 1 : créé en 1995, 52 000ha, 980 familles dont 501 propriétaires..

Ce dernier est l'assentamento obtenu après l'occupation des terres de la fazenda Cachimbo par les anciens chercheurs d'or. Les terres sont situées entre le *município* de Matupá au nord et celui de Marcelândia au sud. Il s'agit d'une zone accidentée où la terre est peu fertile. L'accès à cette région est difficile et s'effectue à partir de l'ancienne BR 080 (Brasília/Manaus) dont le projet fut abandonné. Cette piste est aujourd'hui revenue à la charge de l'Etat du Mato Grosso (MT 080) et le trafic y est compliqué même en saison sèche. En outre, les routes d'accès sont difficilement carrossables dans la partie orientale de l'assentamento. C'est pourtant dans cette zone de colonisation publique qu'interviennent actuellement les principaux déboisements et brûlis du *município* au profit des pâturages : les colons ne convertissent par leurs terres en pâturages uniquement pour élever du bétail mais aussi pour augmenter la valeur de leurs terres à la revente (Fujisaka & al., 1996).

Le bilan de la colonisation agricole dans cette région est, comme dans le reste de l'Amazonie, mitigé. Si, dans le cadre de la « marche vers l'ouest » inspirée des écrits de Golbery : il s'agissait « *d'inonder de civilisation la forêt amazonienne sous le couvert des 'nodules' frontaliers, à partir de la base avancée du Centre Ouest, en coordination avec la progression Est-Ouest selon l'axe du grand fleuve* » (cité par Foucher, 1991), dans la réalité, « *la marche vers l'ouest est une fuite en avant qui permet d'é luder temporairement la situation critique des paysanneries de la région littorale* » (Bret, 1977). **L'essor démographique est pourtant incontestable** : la population de l'Amazonie Légale est passé de 5,6 millions en 1960 à 11 millions en 1980, 17 millions en 1991 et près de 30 sont projetés pour 2010. Pour le nord du Mato Grosso, la population est passée de 60000 habitants en 1970 à 280000 en 1980, 700000 en 1991 et près d'un million actuellement.

Cependant, les densités restent faibles, au point que l'on peut avoir l'impression qu'« *au premier abord, l'Amazonie est vide d'habitants* » (Polidori et al., 2001). En fait **les activités traditionnelles (bois, garimpos) sont relativement « fugitives » et contribuent peu à fixer durablement les populations.** En outre, l'activité principale, l'élevage extensif, crée peu d'emplois : un travailleur pour 330 têtes de bétail soit, avec une densité d'un bovin pour 2,5ha cela ne représente qu'un emploi pour 800ha de terre défrichée. **La rentabilité est elle-même assez limitée** avec environ 30kg/ha/an. Même si le troupeau amazonien est important avec 14 millions de bovins, soit 10% du Brésil, cela reste modeste ramené à la surface de la région.

Par ailleurs, de nombreuses critiques ont été formulées concernant la politique de mise en valeur par de petits producteurs (Le Borgne David, 1996 ; Arnaud de Sartre, 2003). Plusieurs auteurs et organisations ont notamment stigmatisé les **causes de l'échec de la petite colonisation en Amazonie** :

- fertilité des sols et potentialités naturelles surestimées
- conditions de vie pénibles (malaria,...)
- absence et/ou insuffisance des infrastructures
- systèmes d'exploitation inadaptés
- dépendances aux intermédiaires, prix et marchés agricoles
- endettement
- concurrence pour l'espace, conflits d'intérêts avec éleveurs et grands producteurs

On doit alors se demander si le modèle de la grande culture capitaliste basée sur le soja permet de faire les mêmes constats.

1.3 - Vers le soja : exemple de la Chapada dos Parecis

La région de la Chapada dos Parecis (*municípios* de Tangará da Serra, Diamantino et Campo Novo do Parecis), dans le Centre-Ouest du Mato Grosso, est particulièrement révélatrice de l'orientation de la région des cerrados vers une agro-industrie exportatrice. Elle connaît également une juxtaposition des types de colonisation et de paysanneries présentes dans l'arc de déforestation amazonien. A côté d'une petite polyculture vivrière, cohabitent de gigantesques fazendas d'élevage extensif (Seguy & Bouzinac, 1996), mais également des exploitations produisant des cultures généralement destinées à l'exportation et principalement le soja.

131- Une région agricole riche et diversifiée

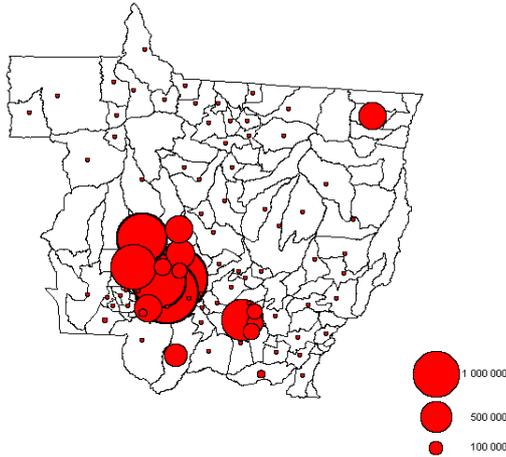
En une trentaine d'années, le Mato Grosso est devenu une des régions agricoles les plus productives du Brésil. Dans cet Etat, les activités agricoles sont longtemps restées dérisoires et réservées à une demande locale peu importante. L'expansion du front pionnier agricole et la colonisation des vastes espaces du Centre-Ouest à partir des années 1970 (Aubertin, 1990) a profondément modifié la carte de la répartition des aires de production, l'ambition des gouverneurs successifs du Mato Grosso étant de faire de cet Etat un des greniers du Brésil. Au début du XXI^e siècle, ce pari semble en passe d'être réussi au vu des chiffres absolus de production (IBGE). Ainsi, en 2001, le Mato Grosso est devenu le premier Etat brésilien producteur de coton avec près de 58% de la production nationale. C'est également le premier Etat pour la production de soja avec 9,5 millions de tonnes produites en 2001, soit le quart de la production nationale. C'est aussi le second Etat producteur de sorgho avec près de 200 000 tonnes produites soit un cinquième de la production brésilienne. Enfin, le Mato Grosso produit également plus de 11% du riz brésilien (Mendez et al., 2002).

La localisation des aires de production agricole dans l'Etat du Mato Grosso (figure 1.24) fait ressortir trois pôles principaux :

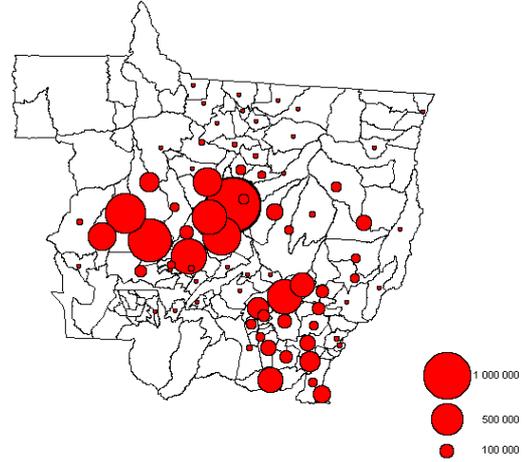
- La région de Primavera do Leste, Campo Verde et Rondonópolis, où le coton et le maïs tiennent une place essentielle (figure 1.26).
- La région de Sorriso qui s'étend en fait de Nova Mutum à Sinop le long de la BR-163 (Cuiabá-Santarém). Soja et maïs constituent ici l'essentiel des activités agricoles mais la place importante occupée par le riz (figure 1.26) suggère que de nombreuses terres sont encore en cours d'ouverture (Mendez et Ferreira, 2005). En effet, les agriculteurs plantent du riz durant les deux années suivant le défrichement de la forêt ou du cerrado pour préparer et améliorer les qualités du sol.
- La région de la Chapada dos Parecis, enfin, qui correspond aux *municípios* de Tangará da Serra, Diamantino, Campo Novo do Parecis et Sapezal. Cette région, si on lui associe les *municípios* voisins de Nova Olímpia et Barra do Bugres, apparaît plus diversifiée avec une part importante de la production nationale de canne à sucre (photo 1.18) du soja et du sorgho.

Figure 1.24 :
Principales productions agricoles (tonnes) au Mato Grosso (source :IBGE, 2002)
Attention : échelle différente pour le soja et la canne à sucre !!

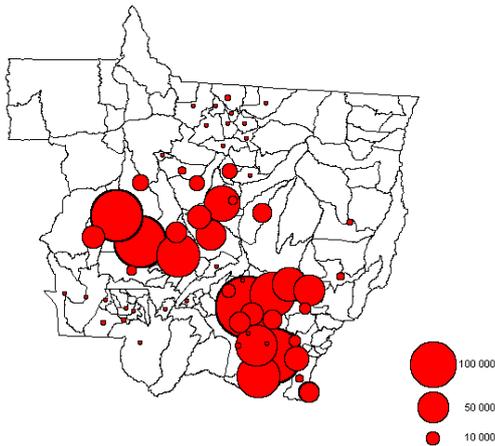
a- Canne à sucre :



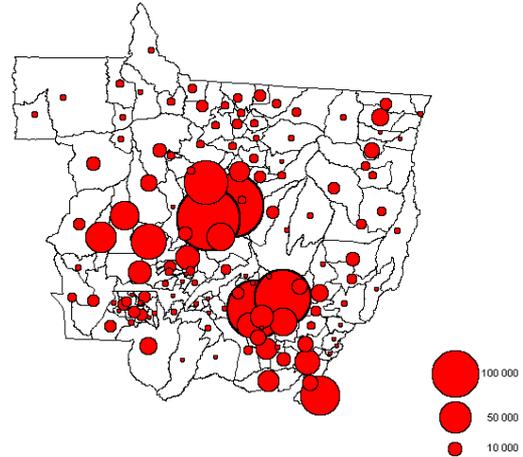
b- soja :



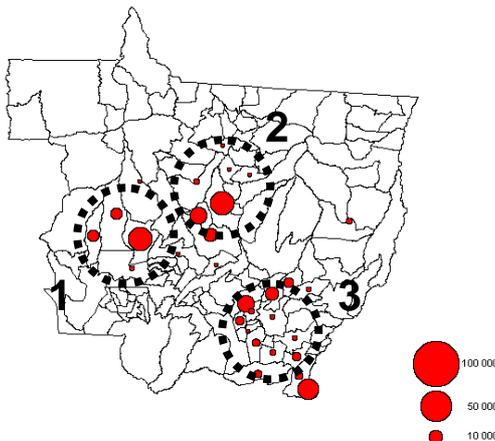
c- Coton :



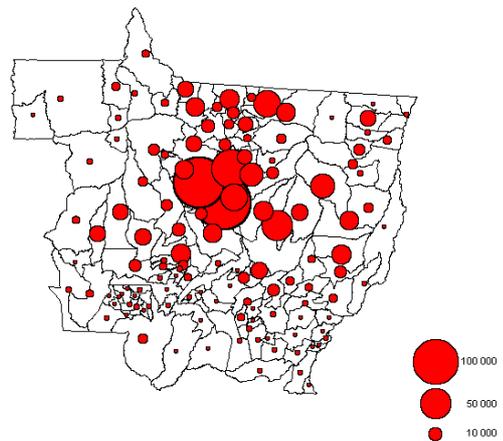
d- maïs :



e- Sorgho :



f- Riz :



Principaux pôles de production agricoles du Mato Grosso :

1 : Tangará -Campo Novo do Parecis ; **2 :** Sorriso-Sinop ; **3 :** Primavera do L.-Campo Verde

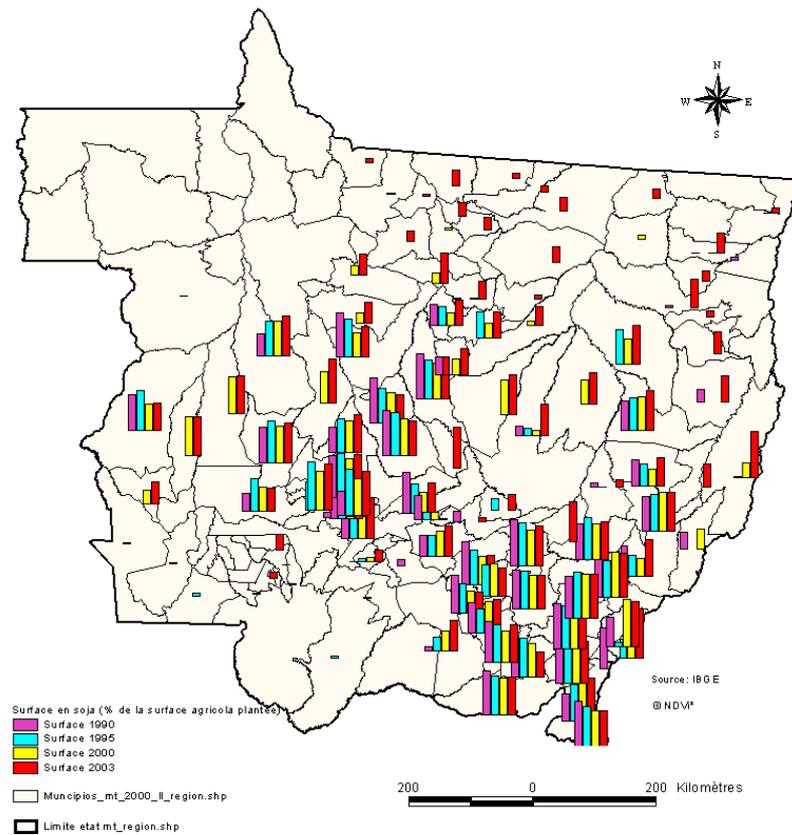


Figure 1.25: Evolution de la production de soja par município au Mato Grosso de 1990 à 2003

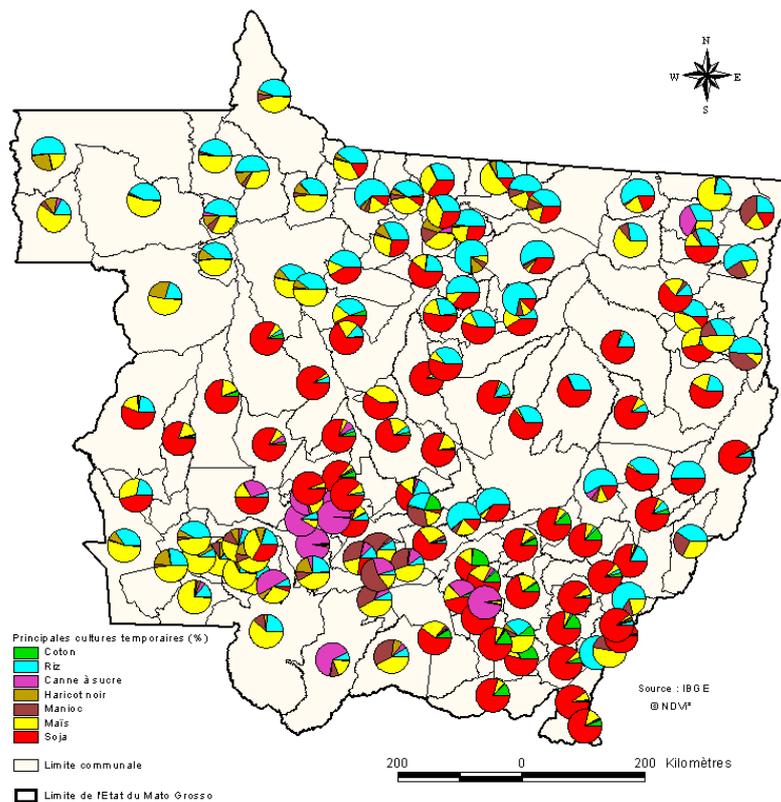


Figure 1.26 : Principales cultures temporaires par município en 2003

La région de Tangara da Serra correspond donc à un des pôles majeurs de production de l'Etat du Mato Grosso. Cette région de la Chapada dos Parecis apparaît comme le modèle de la grande culture mécanisée (photo 1.19) le plus souvent destinée à l'exportation. Installées sur une topographie plane et sur des sols bien drainés, les cultures de soja connaissent le plus souvent des rendements supérieurs à 25 quintaux par hectare (pour une moyenne de 23 au Mato Grosso et 19 pour le Brésil). Les sols acides du cerrado sont facilement amendables par le calcaire disponible à relative proximité (carrières de Tangará da Serra et de Nobres): ces amendements, pratiqués à grande échelle, sont encouragés aussi bien par les ingénieurs agronomes des fazendas ou des sociétés de colonisation que par les techniciens de l'EMBRAPA (*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* fondée en 1973 par le ministère de l'agriculture). et de l'EMPAER (*Empresa Matogrossense de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural*). Depuis 30 ans, la région a donc connu une formidable évolution vers un système agro-industriel orienté vers l'exportation.



Photo 1.18 : Culture de la canne à sucre sur la Chapada dos Parecis (*município* de Diamantino) ; à l'arrière plan, distillerie de canne pour la production d'alcool (NDVi², juillet 2002)



Photo 1.19 : Récolte mécanisée du coton dans la Chapada dos Parecis, *município* de Campo Novo do Parecis (V. Dubreuil, juin 1999)

132- Les étapes de la mise en place et de la conquête pionnière

Jusqu'au XVIIIe siècle, la région de Tangará da Serra était occupée uniquement par des tribus indiennes Paresis et Nhambiquaras. A cette époque les rios Paraguai et Sepotuba sont utilisés comme voie de pénétration pour la recherche de mines qui se développent dans la région de Diamantino, ville fondée en 1728. Après le déclin des mines, dans les années 1880, cette partie du Mato Grosso est explorée pour la recherche des *Ipecacuanhas* (arbres dont on extrait la *poaia* à vertu médicinale) présents dans la région. Au XIXe, se développe l'exploitation du latex d'hévéa dont la production est regroupée à Barra do Bugres pendant la saison sèche tandis que l'exploitation de la *poaia* se concentre pendant la saison des pluies. En 1950, le *município* de Barra do Bugres (correspondant à peu près au territoire des actuels *municípios* de la région de Tangará de l'IBGE) ne comptait que 3 500 habitants.

La colonisation agricole débute réellement dans les années 1950. En 1955, les premiers pionniers s'implantent à proximité de l'actuelle ville de Tangará da Serra. Ces colons

s'installent dans des minifundios et plantent 3 à 4 millions de pieds de café (environ 3000 hectares répartis sur 500 propriétés). En 1960, Joaquim Oléas et Wanderley Martinez créent la SITA (*Sociedade Imobiliária Tupã para Agricultura*) et fondent la ville de Tangará. Le nom de Tangará est celui d'un oiseau reconnu pour sa beauté : selon la légende, « *lorsqu'il commence à chanter, les autres oiseaux s'arrêtent, le choix du nom de Tangará correspond donc au désir de créer un lieu admiré de tous* » (Ferreira, 2001).

La vague essentielle de mise en valeur agricole et de peuplement de cette région date des années 1970. Le Centre-Ouest est alors considéré par les pouvoirs publics comme une région propice à résoudre la majorité des problèmes du pays. Le territoire peu peuplé, la disponibilité des terres, la possibilité d'aller toujours plus à l'Ouest, tout cela a stimulé l'avancée de la frontière agricole (Becker, 1990 ; Lena, 1992). Le premier Plan d'Intégration Nationale (1970) attribua une importance primordiale au développement de la « Nouvelle Amazonie » par la mise en œuvre d'une politique de stimulation à la formation de pôles agricoles et industriels (Droulers, 1995). Le projet Polocentro concerne les cerrados et notamment la région de la Chapada dos Parecis, zones où les sols étaient considérés comme pauvres et impropres à l'agriculture jusqu'en 1970 (Waniez, 1992). Ce plan propose des facilités de crédit pour les agriculteurs désireux d'investir dans l'amélioration de leur terre, poursuit la construction et l'amélioration des voies de communication (la route MT-170 Tangará Campo Novo est ouverte puis asphaltée au milieu des années 1980), soutient le prolongement des lignes électriques et implante de nouvelles infrastructures de stockage : les cerrados attirent alors les "sudistes", avec le soja comme locomotive d'une agro-industrie exportatrice.

C'est dans ce contexte que s'installent les grandes fazendas et des grandes sociétés dans la Chapada et la région de Tangará. Le développement des services et des filières amont et aval des productions agricoles dynamise le pôle urbain de Tangará qui devient *município* autonome en 1976. Sur le plateau, les premières fazendas s'accordent en 1981 pour organiser un nouveau centre urbain autour du lieu dit « Campo Novo ». L'implantation de la firme et de la distillerie de canne Coprodia et des commerces va favoriser l'essor de la ville nouvelle qui acquiert son indépendance municipale en 1988 : rapidement, Campo Novo devient, après Tangará, une étape importante sur la nouvelle route pionnière qui continue vers le Nord du Mato Grosso. Le développement des activités agricoles sur la Chapada s'accompagne d'une transformation radicale des paysages : le cerrado laisse la place à de vastes parcelles géométriques (figure 1.27).

Les images satellites permettent de retracer les étapes de cette mise en valeur (Bariou et al., 1996 ; Dos Passos, 1998) : la figure 1.28 montre ainsi comment le front pionnier a progressivement gagné du sud-est (des foyers de peuplement historiques de Diamantino et Barra do Bugres) vers la région de Tangará puis sur le plateau en direction de Campo Novo. A la fin des années 1990, dans un contexte national marqué par la « rétractation de l'espace agropastoral » (Waniez et al., 1999), seul le nord du Mato Grosso, le Rondônia et l'ouest de Bahia tiraient leur épingle du jeu et « *semblent encore propices à une extension aux conditions économiques actuelles* ».

Figure 1.27 : Images satellites Landsat de 1975 (à gauche) et 1999 (à droite) sur la Chapada dos Parecis au niveau du croisement de la BR-364 et de la MT-170 ; remarquer l'opposition entre l'ouest (réserve indigène des Paresis) et l'est (fazenda Itamarati).

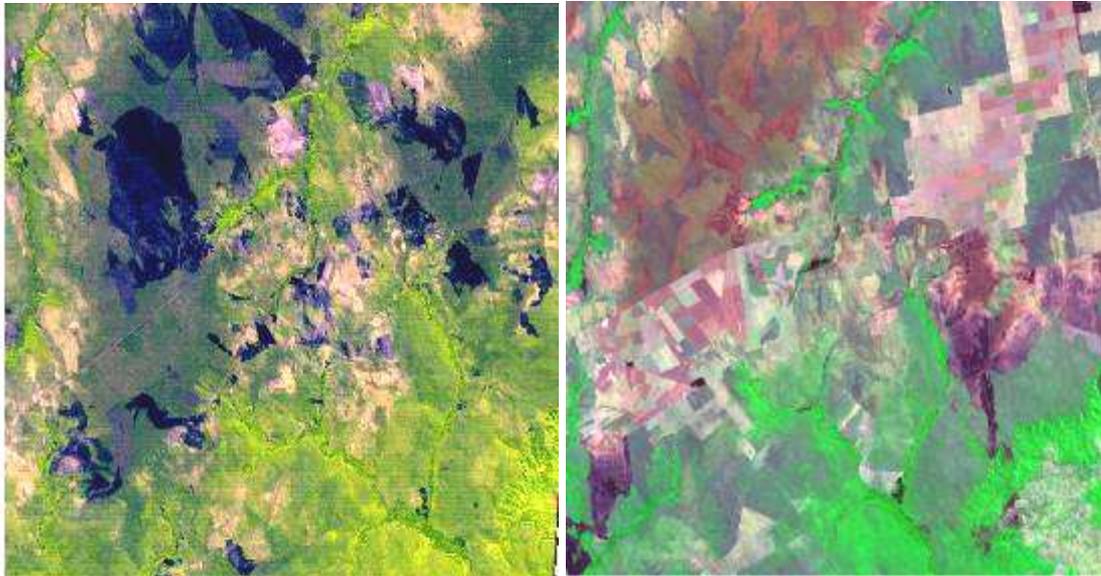
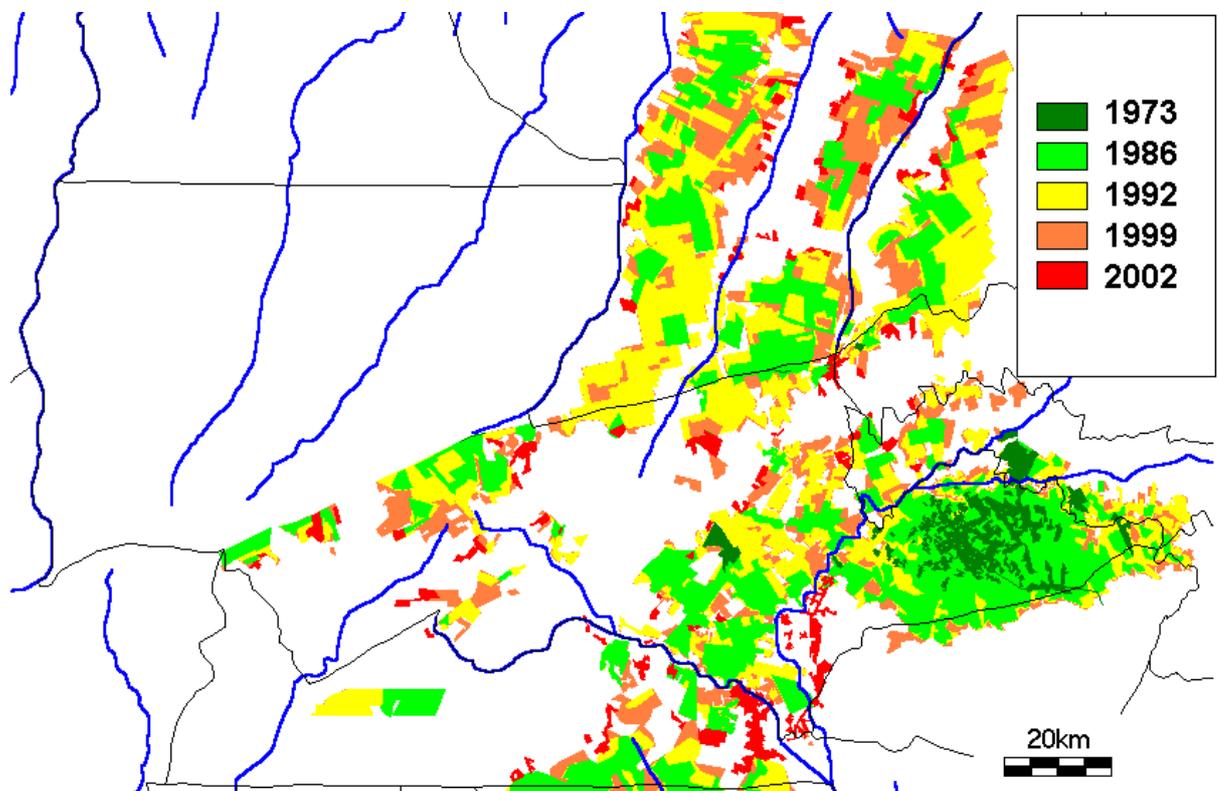


Figure 1.28 : Cartographie par photo-interprétation des images Landsat de l'évolution de la mise en valeur agricole dans la région de Tangará da Serra de 1973 à 2002



133- L'organisation territoriale actuelle : contrastes sociaux et spatiaux

Le *município* de Tangará da Serra compte 60 000 habitants en 2001 dont 45 000 vivent dans la ville qui tend à devenir le pôle régional où se regroupent services (hôpital, université) et commerces de gros et de détail. La plupart des grandes fazendas et de nombreux propriétaires ont d'ailleurs choisi de venir vivre à Tangará et d'y installer leur siège administratif. Campo Novo do Parecis a connu un essor tout aussi spectaculaire avec, en 2001, une population totale de 18 000 habitants, à une très large majorité citadine. Cette croissance rapide des villes du front pionnier est une constante culturelle et politique de la colonisation brésilienne : les projets de colonisation privée sont tous centrés autour d'un pôle urbain principal dont le développement est souvent assuré par la distribution d'un lot urbain pour toute acquisition d'un lot rural. De plus, le centre urbain abrite les bureaux des principales institutions (INCRA, mairie, banque, EMPAER, centre des impôts...), et bénéficie d'investissements destinés à son amélioration (électricité, réseau d'eau, hôpital, collège...). Il assure ainsi son développement par la migration des populations rurales attirées par des conditions de vie meilleure.

Les paysages ruraux autour de Tangará da Serra sont le reflet de l'évolution de la colonisation agricole (figure 1.29). En s'éloignant de la ville, on rencontre successivement des *sítios* et *chácaras*, puis les fazendas d'élevage et les *assentamentos* ruraux, enfin, au-delà sur la Chapada en direction de Campo Novo et la partie occidentale du *município* de Diamantino, la grande culture mécanisée du soja dans les fazendas ; vers le sud-est, une logique comparable s'est mise en place autour des villes de Nova Olímpia et Denise avec la monoculture de la canne à sucre. Cette mise en valeur agricole ne concerne pas les réserves indigènes dont l'extension entre parfois en conflit avec les intérêts des fazendeiros. Ces réserves, et notamment celle des indiens Parecis, représentent 50% de la superficie du *município* de Tangará : cette situation suscite les convoitises des propriétaires ruraux qui ont du mal à admettre qu'une telle surface soit « soustraite » à la production agricole.

Autour de Tangará, des *sítios* et *chácaras* occupent la périphérie proche du centre. L'amélioration de la desserte routière vers Cuiabá, la baisse des cours et l'absence de structures de productions adaptées ont rapidement entraîné le déclin du café au profit des pâturages. Les petits producteurs n'ont pas eu les capacités financières nécessaires pour résister à la fluctuation des cours des cultures pérennes ou pour surmonter les difficultés lors des années de mauvaises récoltes. La culture du café demandant une main d'œuvre familiale importante et, certaines années, les cours du café étant si bas, il était plus avantageux, pour le producteur d'être employé par les fazendas à la préparation des terres ou à la récolte de la canne à sucre que de cueillir sa propre production. Le café a ainsi été progressivement abandonné : la plupart des lots (40 ha en général) ont changé plusieurs fois de propriétaires qui se sont orientés vers des produits destinés à l'alimentation de la ville (lait, poulets, fruits, légumes). Les *chácaras* ont suivi une double évolution ; quelques unes pratiquent la polyculture de subsistance, beaucoup se sont transformées en résidences de fin de semaine.

Les fazendas d'élevage occupent des portions de territoire plus éloignées de la ville ; c'est le cas de la Gleba Triangulo localisée à 30 km de Tangará. Ce secteur avait également été colonisé dans les années 1960 par les producteurs de café venus du Paraná ; par la suite il fut transformé en pâturages au bénéfice de fazendas de taille

moyenne, malgré des tentatives de récupération par des paysans sans terre en 1985. Plusieurs fazendas se sont installées dans cette région afin de bénéficier des abattoirs frigorifiques de Tangará da Serra et de la proximité de la Chapada dos Parecis pour l'approvisionnement en grains. Désormais, une bonne partie des colons de ce secteur produisent des veaux et de l'aliment pour le bétail de la fazenda du groupe Carrefour.

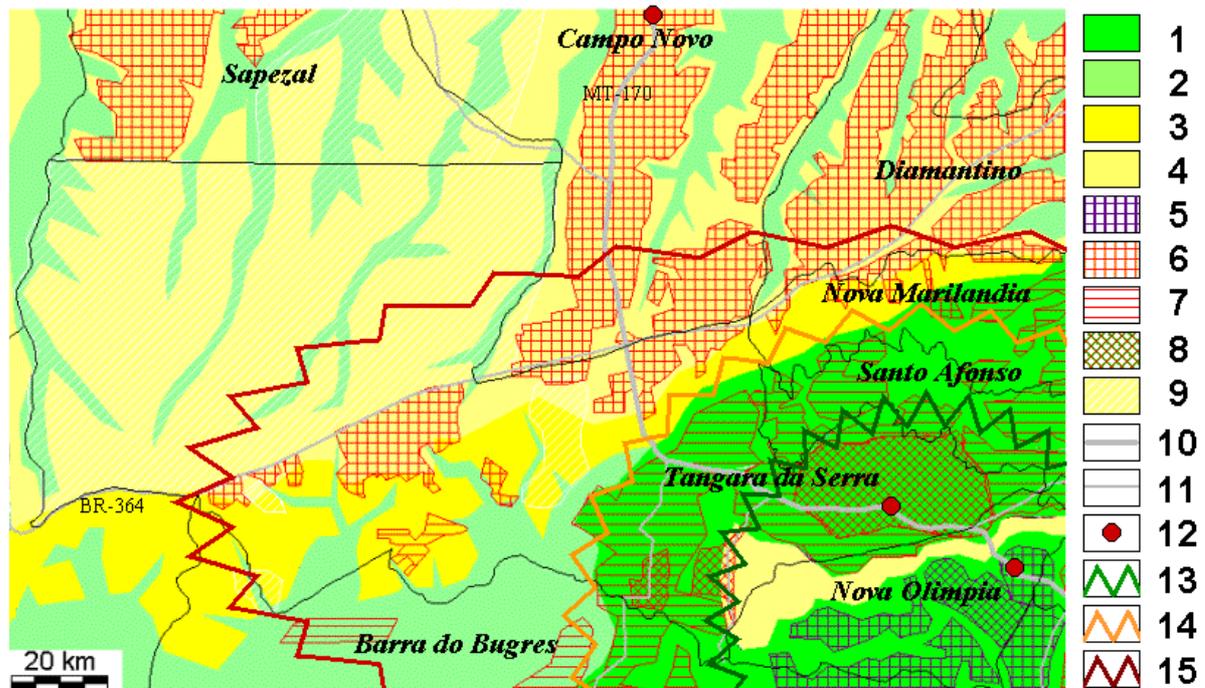


Figure 1.29 : Croquis de synthèse de l'organisation spatiale autour de Tangará da Serra

LEGENDE :

Les conditions naturelles

- 1- Forêt et sols de bonne qualité
- 2- Forêt et sols de qualité médiocre
- 3- Savane parc et sols de qualité médiocre
- 4- *Cerrado* sableux et/ou rocheux; sols nécessitant un apport technologique

La mise en valeur et les paysages agricoles

- 5- Culture de canne à sucre et grand parcellaire dominants
- 6- Culture de soja, maïs et coton et grand parcellaire dominants
- 7- fazenda d'élevage et grand parcellaire dominants
- 8- polyculture et petit parcellaire dominants
- 9- réserves indigènes
- 10- route asphaltée
- 11- pistes principales
- 12- centre urbain

Les étapes du front pionnier

- 13- années 1950
- 14- années 1960-1970
- 15- années 1980

La grande culture mécanisée (soja, coton, canne) occupe de vastes espaces dans la Chapada dos Parecis (figure 1.29). La constitution de la très grande propriété s'est faite dans les années 1970 par la multiplication des achats de terre (Rivière d'Arc, 1977), parfois sous des noms d'emprunt. Les superficies de ces fazendas ont d'ailleurs pu aussi bien être constituées en une seule phase, souvent à but spéculatif ou par rachats successifs de terres (Moreno, 1993). Dans tous les cas, les propriétaires ont pu acquérir des surfaces exploitables bien plus importantes que dans le Sud du Brésil: le propriétaire de la fazenda São Benedito, suite à la vente d'une de ses fazendas de 400 ha dans le Paraná, a pu acheter 4 000 ha dans le Mato Grosso pour constituer un domaine de 11 000 ha au total en 1982. Les agriculteurs rencontrés sur le terrain rejettent par ailleurs l'idée qu'ils contribuent à faire peser une menace sur l'environnement. L'agriculture mécanisée est pour eux un scénario « win-win » pour l'Amazonie : d'un côté la mise en valeur et le développement économique sont incontestables avec une contribution substantielle pour la balance des paiements du Brésil, de l'autre, l'intensification de la production qu'ils opèrent est de nature à réduire la pression sur le besoin d'ouverture de nouvelles terres (Brown et al., 2004).

Ces grandes exploitations de type capitaliste des cerrados sont également l'illustration de la fragilité du modèle brésilien de développement des cerrados et de l'Amazonie méridionale (Flaskerud, 2003):

- Sensibilité aux mouvements spéculatifs et choix des cultures en fonction des cours du marché ou des aides de l'Etat. Ainsi, pour la fazenda São Benedito, la forte inflation de 1994-95 et les dettes accumulées ont empêché les plantations en 1996 et 1997. A la fazenda Santa Isabella (6 950 ha) après 16 années de soja, des difficultés financières ont conduit à louer des terres à d'autres fazendas qui y ont fait de l'élevage («*plante soja que o boi garante*»). Pour beaucoup de fazendas, la marge bénéficiaire est très faible et elles sont très dépendantes vis-à-vis des grands groupes (Cargill, Bünge).
- Coût très élevé des productions (semences, travaux, intrants, main d'œuvre) à l'hectare : 300 \$ pour le soja, 450 \$ pour le maïs, 1 200 \$ pour le coton, 1 500 \$ pour la canne à sucre pour l'année 2001 dans les principales fazendas de la région. Ainsi, en 2001, pour un rendement estimé à 30 quintaux par hectare, le cours du soja devait être supérieur à 0,10 US\$/kg pour générer un bénéfice au producteur : tant que la demande internationale reste forte, comme c'est le cas depuis plusieurs années, la production est rentable mais on peut s'interroger sur les conséquences qu'entraînerait une baisse prolongée des cours du soja (Bertrand, 2004).
- Eloignement des marchés et des centres de transformation : cette région est encore assez mal desservie par les voies de communication modernes ; les productions doivent être acheminées par route jusqu'à Porto Velho (puis par bateau via l'Amazone) ou par les grands ports du Sud (Santos, Paranagua). Même si l'Etat et la Fédération ont beaucoup investi pour améliorer la desserte routière, la détérioration de ces routes (par les pluies tropicales et le trafic intense) et les distances à parcourir restent des freins importants à l'heure actuelle.

- Les aléas pluviométriques: ainsi, les rendements de soja varient fortement d'une année sur l'autre notamment pour la deuxième culture (*safrinha*, voir 2^e partie).
- Problèmes relationnels avec les réserves indiennes, et les Sans-Terre ; toute terre insuffisamment mise en valeur est susceptible d'être envahie et désappropriée au profit de la réforme agraire. Souvent d'ailleurs la mise en valeur initiale se fait sur les terres les plus éloignées du siège de la fazenda de façon à marquer le territoire.
- Ajoutons enfin les problèmes d'environnement (Théry, 1997, 2003) : l'utilisation à grande échelle de produits toxiques est source de graves contaminations des rivières ; la monoculture, la pluie, la chaleur sont autant de facteurs de propagation des maladies ("rouille asiatique").

Depuis les années 1970 le centre ouest du Mato Grosso est devenu une terre de colonisation agricole où les cultures et les pâturages ont fait reculer la forêt et le cerrado. La région de Tangará da Serra et de la Chapada dos Parecis a ainsi connu une transformation spectaculaire de ses paysages qui lui permet de figurer aujourd'hui comme un des principaux pôles de production du soja, du coton et de la canne à sucre du Brésil. « *La progression rapide de ces deux productions (soja et viande bovine) indique clairement que les producteurs ont su installer des itinéraires techniques à même de préserver la durabilité de leurs patrimoines fonciers* » (Le Tourneau, 2004).

L'ampleur des transformations et la rapidité avec lesquelles elles se développent justifient le recours à l'imagerie satellitaire qui, seule, permet un inventaire aussi complet des changements d'usages des sols tout en montrant les configurations spatiales (parcellaires, réseaux) actuelles et héritées. Les enquêtes de terrain réalisées en complément permettent de comprendre comment, dans ces zones nouvelles de peuplement fortement urbanisées, certaines villes, comme Tangará da Serra, se sont hissées au rang de pôle régional de développement. Ce processus de structuration de la frontière agricole à partir de pôles urbains est une donnée importante pour la compréhension de cet espace.

1.4 - La « forêt urbanisée »

« La frontière de peuplement en Amazonie est une frontière urbaine ». « Ce que l'expérience amazonienne a de particulier, c'est la genèse presque instantanée, dans un grand territoire, d'un système urbain qui est à la fois la condition et le produit du processus de peuplement de la région » (Dias & Raud, 2000).

Le processus d'urbanisation n'est, au Brésil comme ailleurs, qu'une des manifestations des transformations souvent radicales que les hommes impriment à la surface de la Terre. Dans ce pays, la végétation naturelle a ainsi largement reculé au profit de zones cultivées ou mises en pâture, non seulement en Amazonie et dans le Centre-ouest, mais aussi, quelques décennies voire quelques siècles plus tôt, au sud et à l'est du pays. Ce processus de transformation anthropique du paysage est particulièrement spectaculaire au Mato Grosso où, depuis les années 1970, ce sont près d'une centaine d'établissements urbains qui ont été fondés, certains d'entre eux approchant aujourd'hui les 100000 habitants comme à Sinop qui servira d'illustration à ce chapitre. Dans cette région « la frontière urbanisée a été implantée par l'Etat en tant que base logistique d'occupation avant même l'expansion de la frontière agricole » (Becker, 2001). Après cette phase de création de villes, la phase actuelle est celle de la croissance de ces centres urbains.

141- L'urbanisation matogrossense

Dépassant 80% en 2000, le taux d'urbanisation de la population brésilienne montre combien la transformation de population majoritairement rurale en population urbaine a été accélérée puisque ce taux n'était que de 45% en 1960. Ce phénomène a pris des caractéristiques particulières au Brésil, où un réseau de petites, moyennes, grandes et très grandes villes s'est rapidement mis en place, souvent en reprenant les axes de colonisation des cycles économiques du pays. De surcroît, dans la dernière décennie, le rôle principal est revenu aux villes moyennes au point d'engendrer le concept de démétropolisation (Santos, 1991).

Par rapport aux autres Etats brésiliens du littoral atlantique où les cycles économiques des XVIe et XVIIe siècles ont entraîné rapidement un certain essor urbain, l'urbanisation du Mato Grosso a connu un développement plus tardif. Les premiers établissements apparaissent au début du XVIIIe siècle en liaison avec le cycle de l'or et des diamants. La fondation des villes à différents moments historiques (XVIIIe, XIXe et XXe siècles) traduit la variété des causes de cet essor urbain: les mines d'or dans les premiers temps de la colonisation pour Cuiabá, Vila Bela ou Diamantino, l'élevage du bétail pour Poconé, l'extraction des diamants plus tard pour Poxoréo... Les différents épisodes historiques au cours desquels se firent les phases d'occupation du territoire eurent une grande influence sur la toponymie des *municípios*, les noms de ces derniers étant liés à des personnalités (Rondonópolis, Peixoto de Azevedo, Santo Antonio de Leverger,...), aux fleuves de la région (Jauru, Juruena), à la religion (Nossa Senhora do Livramento), aux noms indigènes (Poxoréo), aux compagnies de colonisation (Sinop, Nova Mutum), aux villes et villages d'où étaient originaires les migrants (Porto Alegre do Norte, Porto dos Gauchos, Nova Maringa), aux ressources naturelles (Acorizal, Diamantino, Agua Boa, Itaúba,...), etc.

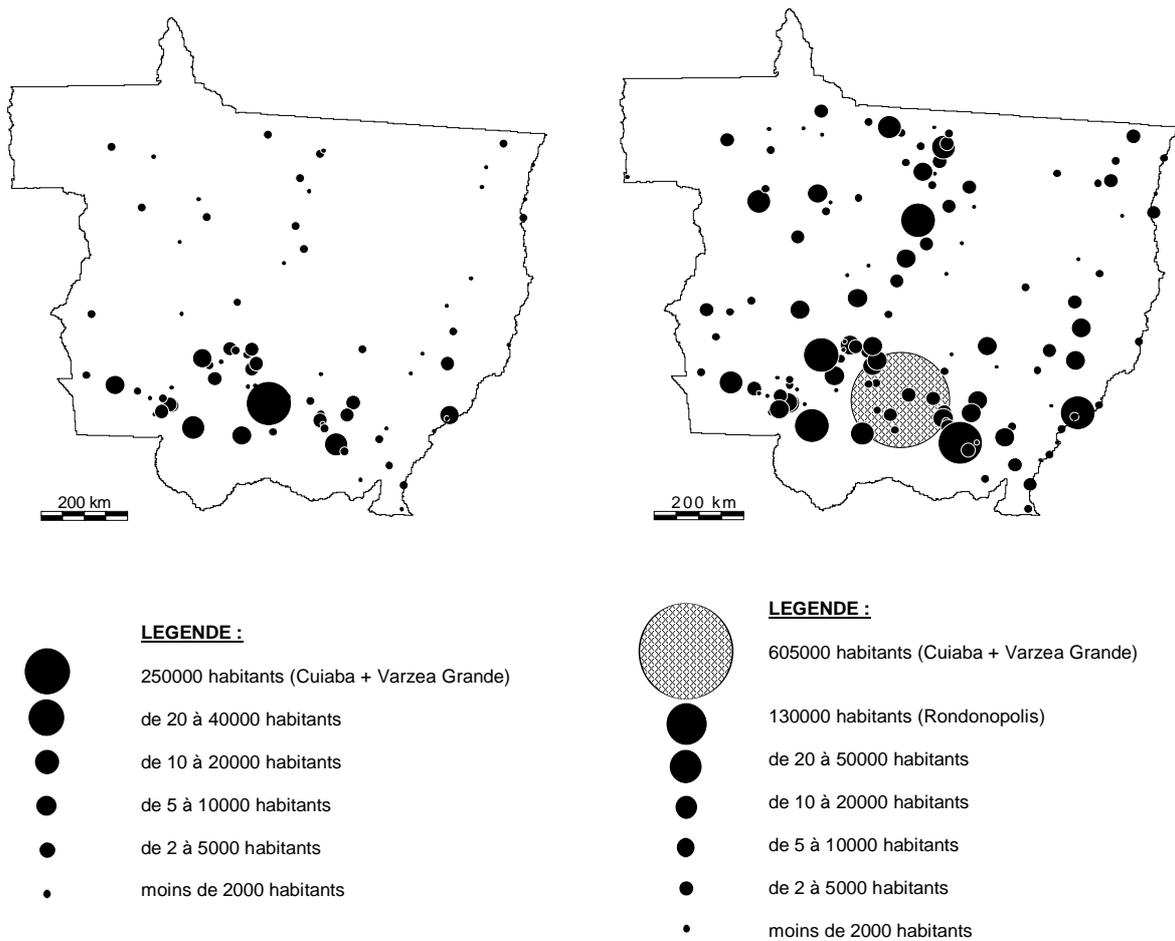


Figure 1.30 : Population des villes du Mato Grosso en 1975 (à gauche) et 1996 (à droite) ; source : Dos Passos, in Dubreuil, 2002



Photos 1.20 : En haut : la ville de Claudia en novembre 1979 (source Colonizadora Sinop) En bas, à gauche, panneau de la piste d'accès à Claudia par la BR-163 au nord de Sinop et, à droite, vue actuelle de l'avenue centrale de Claudia (NDVi², juin 2003)

Une phase d'urbanisation massive et spectaculaire a donc accompagné le processus de colonisation à partir des années 70, et de nombreuses villes furent créées le long des axes routiers intégrant le Mato Grosso au marché national et international. La structuration du réseau urbain s'opère entre 1980 et 1991 (figure 1.30 et 1.31). L'agro-industrie, plus récente (Districts Industriels de Rondonópolis, Cuiabá; etc.), attira les populations traditionnelles (riverains, chercheurs d'or, cueilleurs, etc) qui, tout comme les expulsés des projets ratés de la colonisation, vont être transformés en main d'œuvre urbaine. Ce processus va contribuer à l'édification d'un milieu urbain dégradé, surtout pour la population la plus pauvre qui occupe la périphérie des villes moyennes et des capitales des Etats

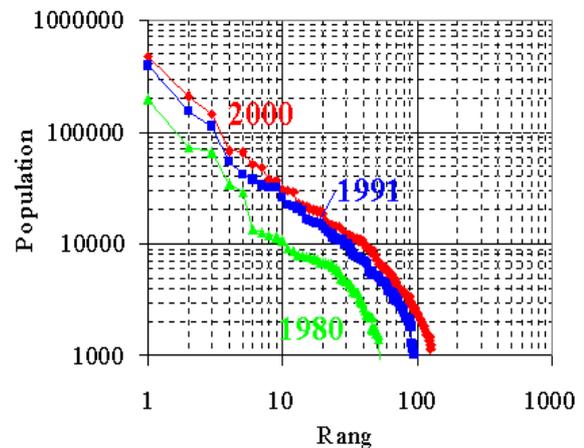


Figure 1.31 : Distribution selon la loi rang-taille des villes du Mato Grosso : noter la structuration qui s'opère entre 1980 et 1991 alors que les courbes de 1991 et 2000 sont très proches.

La cartographie des agglomérations urbaines du Mato Grosso a été réalisée à différentes dates par Dias & Raud (2000). Dans toute la moitié nord de l'Etat il n'existe en 1945 que la localité d'Aripuana. Sur la carte de 1967 apparaissent en plus Porto dos Gauchos et Sao Felix do Araguaia. Au début de la décennie 70, le peuplement reste concentré à Cuiabá et dans ses environs ou dans ce qu'on appelait le "Vieux Mato Grosso". Il n'existait alors qu'une trentaine d'établissements urbains (sièges de *municípios*). En 1980 la carte de Dias & Raud signale la présence des villes suivantes : Alta Floresta, Colider, Santa Terezinha, Luciara, S Jose do Rio Claro, Sinop, Nova Xavantina, Agua Boa et Canarana. En fait la plupart des autres villes existant aujourd'hui sont déjà officiellement fondées et, si elles ne sont pas encore considérées comme des villes, ces centres sont en plein essor démographique. Ceci peut aussi être illustré par l'évolution de la maille municipale : 95 *municípios* à la fin de la décennie 80 contre plus de 140 actuellement. La population urbaine matogrossense passe de 655000 personnes en 1980 à près de 2,5 millions aujourd'hui ; le taux d'urbanisation de l'Etat passe, pour les mêmes dates, de 57% à près de 80%.

Avec l'émancipation des *municípios*, les centres urbains, promus préfectures, se structurent : administration, commerces, services s'implantent pour desservir la population. Le réseau urbain s'étoffe avec la poursuite du mouvement migratoire et le nombre de villes de plus de 10000 habitants passe de 8 en 1975 à 32 en 1996. La population de Cuiabá double tous les 15 ans et l'agglomération Cuiabá – Varzea Grande regroupe désormais plus de 600000 personnes soit un quart de la population de l'Etat. Au total, dans la moitié nord du Mato Grosso, c'est une cinquantaine de nouveaux établissements urbains qui sont fondés entre 1970 et 1990. En 2000, le seuil de 20000 habitants apparaît sur la distribution rang-taille (figure 1.31).



Photo 1.21 : le siège de la municipalité de Vera (prefeitura) en 2002. La nouvelle construction en dur en périphérie de la ville a remplacé la construction en bois du centre NDVi², mai 2002

142- La croissance urbaine à SINOP : une dynamique récente

Le développement de SINOP et de la Gleba Celeste est très emblématique de la colonisation privée mise en place dans le nord du Mato Grosso dans les années 70. La BR-163 joue un rôle fondamental, c'est la voie des migrants, « *a estrada dos colonos* » véritable cordon ombilical qui relie le nord du Mato Grosso à la civilisation et sert de point d'ancrage au peuplement. Son ouverture par les militaires, au début des années 70, est suivie peu après par l'implantation de la Société Immobilière du Nord-Ouest du Parana (SINOP) dans la forêt de transition. Cette dernière société, créée à la fin des années 40, a déjà bâti 11 villes au Parana et en 1972 Enio PEPINO achète alors, en accord avec l'INCRA, 645 000 hectares dans ce qu'on appelait à l'époque la Gleba Celeste (le projet sera étendu à près d'un million d'hectares en 1981). Les noyaux de peuplement ou centres urbains sont fondés en bordure de la route ou des pistes principales, noyaux plus ou moins importants, avec un plan en damier et une subdivision en quartiers administratif, résidentiels, commerciaux, industriels. Ainsi naissent Vera en 1971, Santa Carmem en 1972, puis Sinop en 1974, Claudia enfin en 1978 (Clairay, Dubreuil, 2002). La fondation de la ville de Sinop le 14 septembre 1974 a lieu en présence du Ministre de l'Intérieur Rangel Reis ; le district de Sinop est créé en juin 1976 et le *município* en 1979 : 20 ans plus tard la mise en valeur du *município* est bien avancée (figures 1.32 et 1.33).

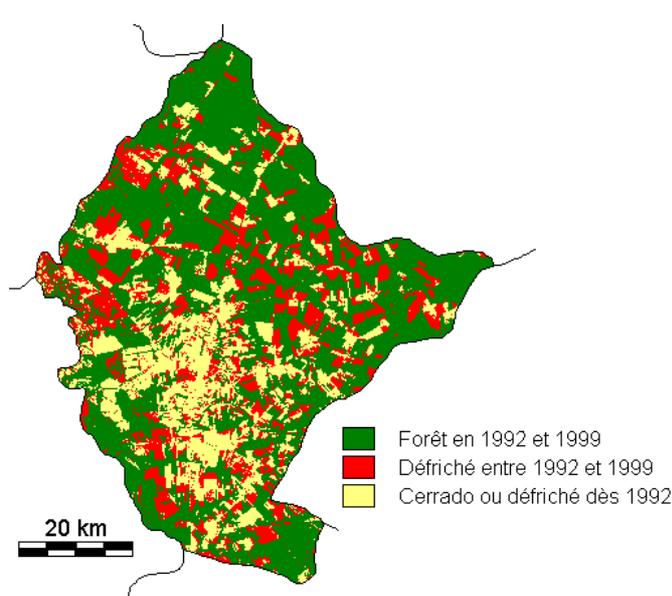


Figure 1.32 : Evolution de la déforestation sur le *município* de Sinop

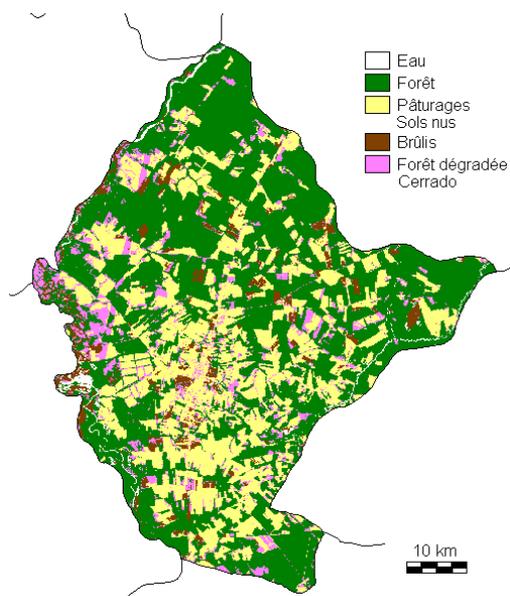


Figure 1.33 : Occupation du sol sur le *município* de Sinop en 1999

Dès la fondation, on prévoit grand avec quelques rares rues asphaltées au début, des plantations d'arbres et de fleurs le long des artères principales aux noms parfois évocateurs comme à Sinop où le plan de la ville ressemble à une maison, les rues ont des noms de fleurs ou d'arbres, les rivières et les principaux quartiers de la ville des prénoms féminins. Aux entrées de la ville, zones industrielles, coopératives et scieries: on en a compté jusqu'à 700 à Sinop ; en 2003, il en reste encore officiellement 274 regroupant 9500 emplois directs et 8500 indirects. Au-delà des quartiers péri-centraux, une « ceinture verte » où s'installent les premiers colons avec des exploitations très disparates, de 5 à 50 hectares. Ces chacarras

étaient destinées en principe à l'alimentation de la ville. Le processus de colonisation accéléré s'accompagne d'un intense défrichement de la forêt. Ainsi, les images du satellite Landsat (figure 1.32) montrent que le taux de couverture forestière de l'ensemble du *município* de Sinop (3142 km²) est passé de 76% en 1992 à 57% en 1999, ce qui représente une diminution de la surface en forêt de plus de 600 km² en 7 ans ! En 2003, ce taux est même passé en dessous de 45% et ce sont finalement près de 1500 km² de forêt qui ont disparu en 10 ans. Tout comme le processus de déforestation, le développement rapide et spectaculaire de l'extension spatiale de la ville de Sinop se prête particulièrement bien à un suivi par imagerie satellitaire.

143- Cartographie par télédétection de l'aire urbaine de SINOP

La fondation et les premières phases de croissance des villes du nord du Mato Grosso sont contemporaines de la mise en orbite des premiers satellites d'observation de la terre (Landsat 1 en 1972). Les différentes missions de ce programme (MSS, TM, ETM+) permettent donc de suivre régulièrement la croissance urbaine de ces villes. Pour cette étude nous avons utilisé les images MSS du 13 juin 1975 (WRS 243-068) et du 8 juillet 1986 (WRS 226-068), l'image TM du 19 mai 1992 (WRS 226-068) et les images ETM+ du 19 août 1999 (WRS 226-68) et du 10 février 2003 (WRS 227-68). Les survols aériens du programme RADAMBRASIL ont également été utilisés pour préciser les limites de l'urbanisation en 1978-79. Dans tous les cas (sauf pour l'année 2003), les observations portent sur la période correspondant à la saison sèche, ce qui permet de bien distinguer la forêt des sols nus ou des cultures. La séparation entre la zone urbanisée et l'espace agricole et forestier a été obtenue à partir d'une interprétation visuelle des compositions colorées classiques en Rouge-Vert-Bleu : canaux 7, 4, 5 pour MSS et canaux 4, 5, 3 pour TM et ETM+. Toutes les images ont ensuite été corrigées géométriquement pour pouvoir être superposées dans un même repère cartographique d'un Système d'Information Géographique afin de comparer les surfaces concernées par l'urbanisation aux différentes dates.

L'approche visuelle interprétative a été privilégiée (« *Vision is easy for humans, but it is very difficult to construct a computer vision system for image understanding* » ; Wang, 1993) mais les recherches en cours visent à réaliser des détections plus automatiques des contours urbains à l'aide de méthode combinant une approche spectrale (présentée ici) mais aussi des critères structuraux (forte hétérogénéité urbaine). Ce type de méthode orientée objet (Puissant, 2003) s'appuie notamment sur les nouvelles potentialités offertes par des logiciels du type E-cognition dont la phase de test a débuté en 2005 sur la ville de Rennes (du fait de la plus grande facilité de contrôle terrain et de la disponibilité de photographies aériennes) dans le cadre du programme ECORURB et devrait prochainement être étendue aux villes matogrossenses.

Tableau 1.7 : Evolution de la surface urbanisée et de la population à Sinop :

Année	Superficie (ha)	Année	Population
1975	40	(sources : IBGE et Préfecture de Sinop)	
1979	200	1980	19886
1986	750	1991	38327
1992	1200	1996	54306
1999	2130	2000	74761
2003	2560	2003	82989



A- 1972 (source :Colonizadora SINOP)



E- 1974 (source :Colonizadora SINOP)



B- 1974 (source :Colonizadora SINOP)



F- 1978 (source :radambrasil)



C- 1981 (source :Colonizadora SINOP)



G- 1999 (source :V.Dubreuil)



D- 2002 (source :NDVi²)



H- 2003 (source :Colonizadora SINOP)

Photos n° 1.22 : vues aériennes (à droite) et de l'avenue centrale (à gauche) de Sinop

La figure 1.34 et le tableau 1.7 montrent le résultat du travail de photo-interprétation réalisé à partir des images Landsat. Au début des années 70 et 80, les taux de croissance relative sont spectaculaires : la surface urbanisée quintuple de 1975 à 1979 et quadruple encore de 1979 à 1986. Pendant la décennie 1980, l'augmentation moyenne annuelle de l'aire urbaine de Sinop est de l'ordre de 80 hectares. Mais le plus remarquable encore est l'intensification du processus pendant les années 90 : certes, en valeur relative, la surface urbanisée ne fait « que » doubler de 1992 à 1999, mais cela correspond en fait à une augmentation moyenne de 130 hectares par an. En outre, ce rythme de croissance reste soutenu jusqu'en 2003 puisque entre les deux dernières dates ce sont 108 hectares qui sont incorporés chaque année dans l'agglomération de Sinop. Au début, ce que ne permettent pas de voir les images Landsat à résolution trop faible (80 mètres pour MSS, 30 mètres pour TM), bien des habitations sont en bois, l'espace est loin d'être comblé ; peu à peu, surtout si le nucleo grandit vite comme c'est le cas de Sinop le cœur de la ville s'embellit avec des magasins à architecture moderne, des parcs fleuris.... Les rues sont asphaltées, et dans les quartiers péri-centraux plus pauvres les constructions en dur tendent à supplanter le provisoire : en 2003, les constructions en bois représentent, selon les quartiers, entre 45 et 85% des types de constructions.

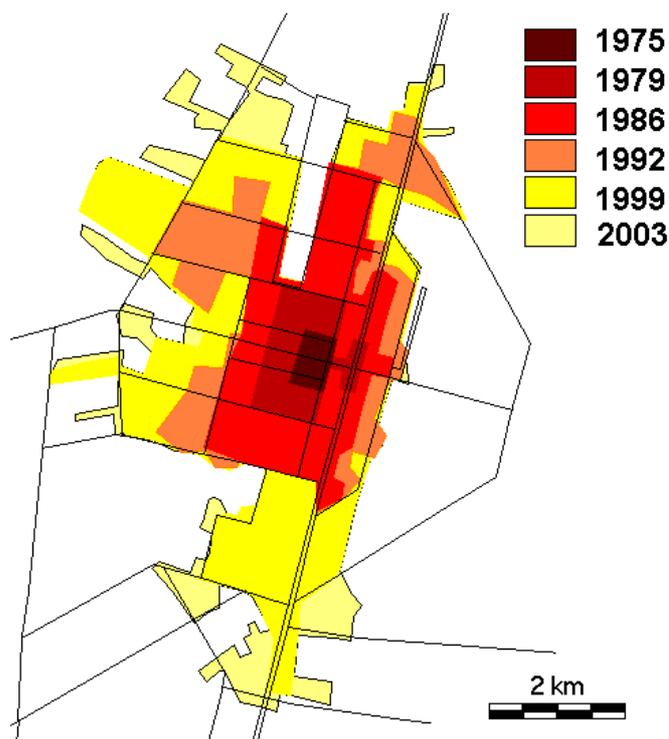


Figure 1.34 : Cartographie par photo-interprétation d'images Landsat de l'évolution de l'aire urbaine de Sinop (1975-2003)



Photo 1.23 : Sinop vue d'avion ; à gauche, la BR-163 Cuiaba-Santarem. (V. Dubreuil, juin 1999)

A partir d'un maillage géométrique de pistes puis de routes asphaltées, le développement de la ville s'est effectué prioritairement selon 2 axes. Un axe nord-sud correspondant à la BR-163, route qui relie Cuiaba au nord de l'Etat du Mato Grosso et, au delà, jusqu'au Para ; cette liaison routière est structurante non seulement à l'échelle régionale mais aussi à l'échelle locale, la plupart des entreprises et des services liés au transit étant installés le long de cette BR. Dès le début, les quartiers résidentiels ont été implantés à l'ouest de la BR, la partie est étant réservée aux industries, liées au bois d'abord exclusivement (un schéma très proche peut d'ailleurs être observé pour les nucleos urbains de Sorriso ou Lucas do Rio Verde plus au

sud) ; dans cette partie orientale industrielle de la ville la population a longtemps connu des problèmes de santé liés à la pollution de l'air par les fumées des scieries (photos 1.24 et 1.25) : ainsi, même si les chiffres sont en baisse depuis quelques années, les problèmes respiratoires représentent encore 16 à 21% des cas déclarés d'admission en clinique et hôpitaux en 2003 (Secrétariat de la Santé de Sinop, 2004) avec des pics observés en fin de saison sèche de juillet à septembre (chiffres auxquels il faudrait ajouter ceux liés aux problèmes oculaires pour lesquels il n'existe pas de programme de suivi).



Photo 1.24 : Les fumées des scieries à Sinop
Vue aérienne du quartier des scieries au sud-est de la ville (V.Dubreuil, juin 1999)



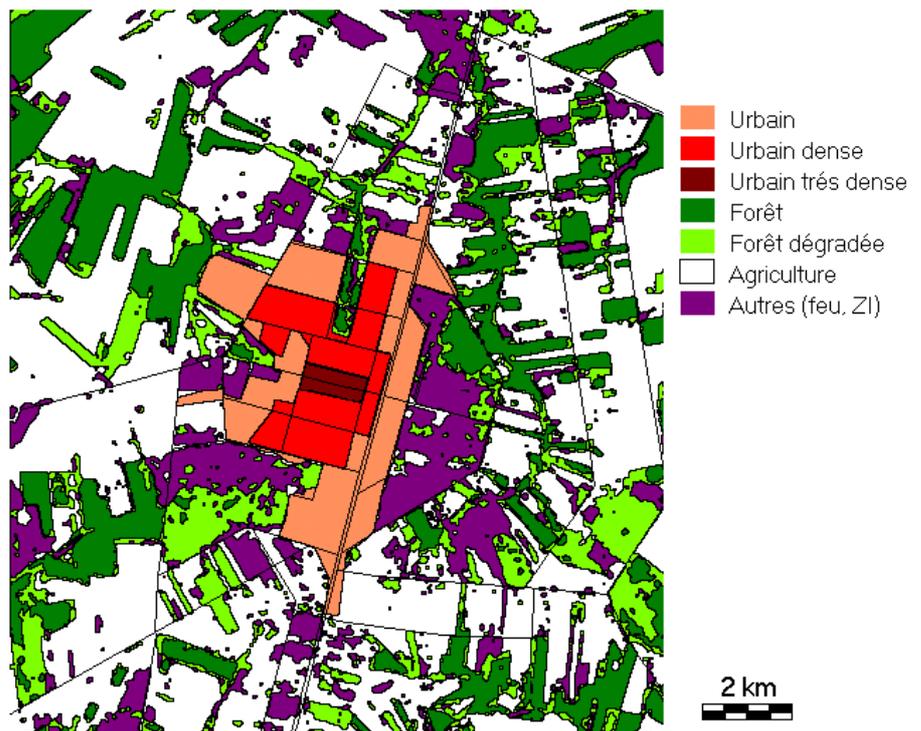
Photo 1.25 : séance d'inhalation à l'hôpital de Sinop
 (photo : H.Potier, mars 2005)

Un second axe d'urbanisation se dessine vers l'ouest ; en fait, A Sinop, cette extension vers l'ouest (en direction du Teles Pires et du nouvel aéroport) a surtout été importante dans les années 90 où de nombreux quartiers ont été aménagés pour accueillir des migrants venant du sud du pays. Mais les villes comme Sinop sont aussi des « refuges » pour les migrants qui ne trouvent pas de terres et leurs familles (celles qui ne peuvent les accompagner sur les lotissements isolés et manquent de toute infrastructure de santé et d'éducation); ce sont aussi des refuges pour les colons des fronts pionniers du nord de l'Etat qui ne peuvent pas se maintenir sur leur lot, qui sont expulsés pour cause de maladie, ou de force après leur échec économique ou après la vente de leur lot. En outre, dans les colonisations privées, l'achat du lot urbain est souvent lié à l'achat du lot rural : les colons ne vivent donc pas sur leurs terres et l'essentiel du marché du travail rural est en ville.

Au delà de l'aspect purement quantitatif de cette urbanisation, les images Landsat permettent également en partie d'en apprécier sa nature. Pour préciser cette occupation du sol, nous avons choisi de traiter l'image de 1999 qui est plus contrastée (saison sèche) et pour laquelle nous disposons d'importants relevés de terrain réalisés en juin 1999 et mai 2000. Des observations in-situ en 2002 et en 2003 ont également permis de lever certaines ambiguïtés et confirmer les tendances décelées à partir de l'image Landsat. Réalisée à partir d'une interprétation visuelle de la composition colorée Landsat de 1999, la figure 1.35, permet de localiser les différentes formes d'occupation du sol liées à l'urbanisation.

- Le cœur urbain dense correspond à des rues asphaltées et des constructions verticales (2 étages voir plus) généralement jointives et dont le rez de chaussée est souvent occupé par un commerce : nous sommes ici en présence d'un centre-ville assez « classique » dans sa forme et ses fonctions essentiellement tertiaires.

Figure 1.35 :
Occupation du sol
autour de Sinop en
1999 (d'après image
Landsat-ETM+)



- Autour, le secteur « urbain dense » correspond à un secteur plus résidentiel mais où la plupart des constructions sont en dur et où les rues sont asphaltées ; le bâti n'est plus continu avec de nombreux lots urbains conservant un espace vert.
- Ensuite, on trouve les quartiers encore « urbains » mais où l'urbanisation est plus lâche et les habitations majoritairement en bois ; les avenues y sont larges, toutes desservies par l'électricité et avec de nombreux ronds-points en cours d'aménagement.
- Au-delà, commence l'espace rural avec les secteurs agricoles où, depuis quelques années, le riz cède la place au soja et où la forêt occupe une place très réduite (moins de 20% de la surface autour de Sinop même) et sous une forme souvent très dégradée. Autour de la ville elle-même, de nombreux secteurs apparaissent en friche ou récemment brûlés ; certains ont déjà été occupés par les industries et d'autres semblent promis à une future urbanisation notamment à l'est (autour du campus de l'UFMT) et vers l'ouest, au delà de la cathédrale en construction, où sont apparus les premiers *condominios* (quartiers résidentiels fermés et gardés pour les classes sociales aisées).

Photo 1.26 : résidences aisées du quartier Maringa à Sinop
(Photo : H.Potier, avril 2005)



Photo 1.27 : habitat social du quartier Bom Jesus à Sinop
(V.Dubreuil, avril 2005)



144- Surface urbanisée et population urbaine

Le fort lien qui existe dans le cas de Sinop entre la surface urbanisée et la population ($r=0,98$) permet d'envisager de généraliser l'étude des autres villes du front pionnier du nord du Mato Grosso de cette manière. Un des enjeux est de pouvoir rapidement estimer la population agglomérée à partir d'images satellites dans une région où les mouvements de population peuvent être rapides et intenses et où les services statistiques n'ont pas toujours les moyens de les suivre aussi rapidement. En 2005, nous avons ainsi entrepris de pousser plus loin l'analyse (mémoire de master recherche de H.Potier) en étendant ce type d'approche aux communes de Sorriso et d'Alta Floresta. Par ailleurs, cette problématique est un des aspects retenus dans la réponse à l'appel d'offre « modélisation des écosystèmes amazoniens » du département SDV du CNRS auquel nous avons répondu en partenariat avec le centre IRD de Cayenne et plusieurs universités brésiliennes (Belém) intéressées par cette question.

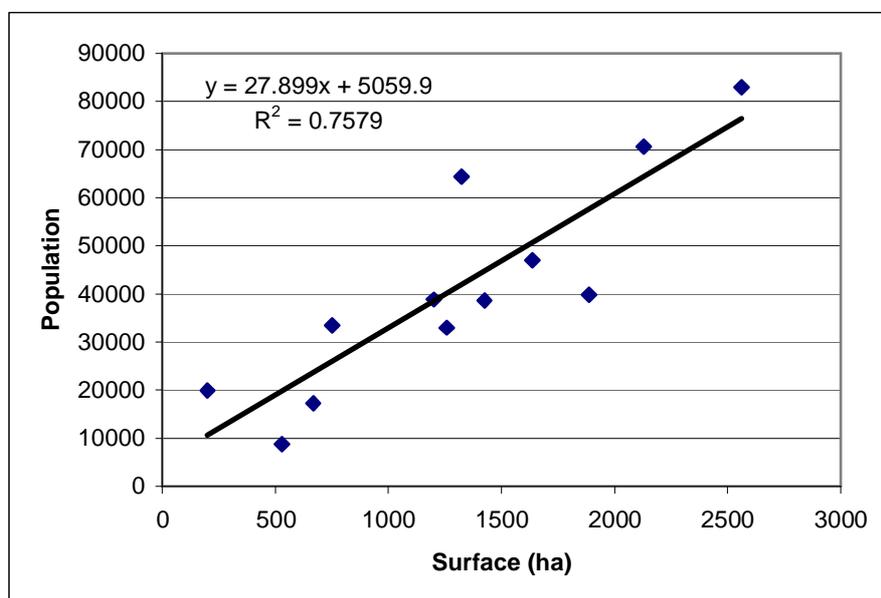


Figure 1.36 : relation entre surface urbanisée et population pour les villes de Sinop, Sorriso et Alta Floresta de 1975 à 2003

La figure 1.36 montre le lien existant pour les 3 villes principales du nord du Mato Grosso entre la surface urbanisée et la population : cette dernière équivaut environ à 30 fois la surface urbanisée exprimée en hectares. Le lien est très significatif ($r=0,87$) mais moins fort que lorsqu'on le calcule pour une seule ville. En effet, la diversité des situations municipales intervient pour expliquer les résidus par rapport à la droite d'ajustement linéaire. Ainsi, l'écart le plus fort (au dessus de la droite) correspond à la population (64000 personnes) atteinte à Alta Floresta lors de la fièvre de l'or de la fin des années 80 et du début des années 90 ; à cette époque une importante population de garimpeiros se sont entassés dans des habitats précaires, l'estimation de la surface ne prenant pas en compte la densité de population effective des quartiers. En outre, dans le cas d'Alta Floresta, le déclin des mines d'or et de la population (39000 habitants en 1999) n'a pas été suivie d'une diminution de la surface urbanisée puisque ce sont le plus souvent certaines maisons qui ont été abandonnées (le quartier et donc la surface urbanisée subsistant) tandis que de nouveaux quartiers continuaient d'être construits

en périphérie soit pour accueillir de nouveaux migrants, soit pour absorber le reflux de population rurale préférant habiter près de la ville plutôt que sur leur lot rural. Le modèle linéaire et l'image satellite doivent, ici encore, être maniés avec précaution et confrontés avec le terrain pour ne pas avancer d'interprétations hâtives et/ou erronées.

Au total, les problèmes posés par cette croissance urbaine très importante sont nombreux et engendrent des conflits socio-spatiaux de grande ampleur (Goueset, 2002). L'un de ces problèmes est lié à la proximité de ces villes et des forêts tropicales, parfois de réserves ou parcs (nationaux ou d'état) naturels et, si les politiques de protection de l'environnement au Brésil comptent parmi les plus dynamiques du monde, elles restent pourtant très difficiles à appliquer. En outre, rares sont les travaux qui ont permis de modéliser cette croissance et de systématiser les problèmes socio-environnementaux qu'elle génère. Un des objectifs de notre projet est de tenter de modéliser cette croissance urbaine. Les applications de ce travail sont nombreuses. Le Brésil a actuellement besoin de plusieurs types d'informations qui complètent celles obtenues par l'IBGE (Institut Brésilien de Géographie et de Statistiques) en matière de données statistiques sur la population... Ces informations peuvent être en premier lieu des cartes obtenues par traitement d'images satellitales mais aussi par une modélisation numérique de la croissance urbaine, permettant ainsi de mettre en place une politique plus efficace dans le domaine de l'aménagement du territoire.

Ce problème n'est pas spécifique au Mato Grosso et se pose avec davantage d'acuité dans le **Nordeste** où nous avons décidé fin 2004 de lancer une nouvelle expérimentation de « *Modélisation par télédétection et analyse spatiale des enjeux et conflits environnementaux posés par la croissance urbaine des métropoles du Nordeste Brésilien* ». Dans cette région, l'érosion de la Mata Atlântica qui, jadis, occupait l'ensemble de la cordillère littorale brésilienne (la Serra do Mar) continue actuellement, et ce, malgré la mise en place de nombreux parcs mais qui, en raison de l'absence de contrôles et d'une véritable politique d'aménagement, sont plus ou moins inefficaces et incapables de préserver la diversité biologique qu'ils contiennent. **En 2005, ce projet de recherche a été retenu par le CNRS pour un accueil de niveau post-doctorat** pour une chercheuse brésilienne en partenariat avec l'Université de São Paulo, et l'Université Fédérale De Rio de Grande do Norte de Natal. Cette proposition est une opportunité pour l'équipe COSTEL d'élargir le spectre de ses collaborations avec le Brésil à la fois sur le plan géographique (littoral du Nordeste) mais aussi sur le plan thématique (conséquences environnementales de la croissance urbaine). **Les travaux initiaux menés au Mato Grosso ou à Rennes (programme ECORURB) sont donc susceptibles d'être transposés dans des contextes géographiques différents.**

Conclusion de la première partie

L'Etat du Mato Grosso est très représentatif des types de paysages et des formes de mises en valeur du Brésil intérieur par la colonisation publique et privée encouragée à partir des années 70 par la politique gouvernementale d'occupation des espaces vierges en Amazonie. L'intense processus de transformation des paysages amazoniens pendant cette période a alimenté de nombreuses discussions concernant les conséquences environnementales régionales voire globales à moyen et long termes. **Le choix du Mato Grosso se révèle particulièrement judicieux dans la mesure où il peut préfigurer l'évolution d'une bonne partie de l'Amazonie méridionale et orientale soumise au processus d'intégration économique.** Dans cette région, la réussite économique incontestable en terme de production agricole ne doit cependant pas occulter les difficultés sociales (conflits liés à la terre, terres indigènes), économiques (fragilité financière des exploitations et dépendance vis-à-vis des cours et des grands groupes) et environnementales. **Dans ces conditions, les stratégies de conquêtes de nouvelles terres et de recherche de nouvelles opportunités économiques en fonction des marchés nationaux et internationaux se perpétuent et le front pionnier progresse encore actuellement plus loin vers le nord de l'Etat :** le Mato Grosso demeure toujours profondément marqué par l'avancée de la frontière agricole et par le mythe de la réussite économique qu'elle entretient.

Une première nécessité était de quantifier le processus de déforestation. **D'un point de vue méthodologique, les données des satellites NOAA ou SPOT-VGT sont très adaptées à la superficie du Mato Grosso et peuvent contribuer à estimer le rapport entre surfaces boisées et déboisées. Cependant, seules les données à haute résolution spatiale peuvent fournir les informations de détail** (cours d'eau secondaires, routes et pistes, extensions urbaines et parcelles de cultures) et servir de support à une validation des images à basse résolution. **Les nouveaux capteurs satellitaires permettent d'entrevoir une double évolution :**

- une meilleure résolution spectrale et spatiale (ASTER, IKONOS, ...) qui permet d'affiner les études au niveau des secteurs tests et préciser les processus en œuvre dans l'altération de la couverture forestière (coupe claire, exploitation sélective,...) ;
- de meilleures séries temporelles à une résolution intermédiaire : les produits MODIS à 250 mètres de résolution permettent désormais un suivi de paramètres simples (indices de végétation de type NDVI).

Ce double constat permet d'entrevoir l'importance des enjeux concernant les interactions entre l'action anthropique et les facteurs naturels et notamment le climat. En effet, **une telle transformation anthropique de la surface de la région (déforestation, urbanisation) ne peut pas être sans conséquences sur le bilan radiatif et donc sur le climat local et régional.** Cependant, avant de préciser et essayer de quantifier l'ampleur de ces interactions, il faut s'arrêter sur l'état de nos connaissances du climat de cette région. Comme pour le suivi de l'occupation du sol, le recours à la télédétection est indispensable, notamment pour une estimation des précipitations (facteur essentiel pour le développement des cultures), en raison de l'insuffisance des autres sources d'information.

2^e partie

LE CLIMAT DU MATO GROSSO : DE LA NECESSITE DU RECOURS A LA TELEDETECTION



Photo 2.1 : Averse convective isolée au-dessus d'une parcelle de maïs au sud de Sinop
(*H.Quenol & V.Dubreuil, avril 2005*)

Introduction de la 2^e partie :

Les études de climatologie reposent avant tout sur les observations du temps faites dans un certain nombre de stations. Ces observations sont parfois très anciennes, comme en Chine (séries de mesures de pluies depuis le Moyen-Age) ou même en Angleterre (XVIII^e). L'historien E. Leroy Ladurie (1983) dans sa thèse "Histoire du climat depuis l'an mil" a prouvé l'utilité de documents écrits ou iconographiques pour l'étude des climats du passé. Des événements climatiques ont pu aussi influencer fortement le cours de l'Histoire lors de certaines batailles (Peguy, 1989). Mais la connaissance du climat de notre planète n'est pas seulement un enjeu stratégique. Fondamentalement ce sont d'abord les activités agricoles (et notamment au Mato Grosso la production de soja et de maïs) qui en dépendent et le climat peut apparaître comme une ressource ou comme une contrainte. Le climat n'est donc pas un élément neutre dans l'espace ou pour le raisonnement géographique: il est un des éléments qui conditionne l'occupation de la Terre par les hommes (Lamarre & Pagney, 1999). Comme l'illustrent les travaux menés au sein du GDR-CNRS Riclim auquel je participe, les adaptations des sociétés sont multiples, fonction du niveau de développement, de leur connaissance des phénomènes climatiques, de leurs moyens (techniques et financiers) qu'elles peuvent mettre en œuvre pour se prémunir des événements climatiques dommageables.

Depuis les années 70, l'observation par satellite de l'atmosphère terrestre a radicalement transformé et amélioré notre connaissance des mécanismes climatiques. Très tôt, les géographes climatologues ont compris l'intérêt des données satellitaires pour leurs études : en témoignent les articles précurseurs de Tonnerre-Guérin (1976), Mounier et Pagney (1982), le succès du manuel de Barrett (1974), l'organisation du 3^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Mounier, 1990) ainsi que de nombreuses thèses soutenues en France (Tabaud, 1989 ; Dubreuil, 1994 ; Wahl, 1997...) ou au Brésil (Lombardo, 1989 ; Mendonça, 1995) où les données de télédétection ont montré toutes leurs potentialités. Plus récemment, l'initiative du GDR-CNRS MSG-ATR (à laquelle je participe également) est venue contribuer à renforcer les coopérations entre climatologues géographes pour l'acquisition et le traitement des images Meteosat Seconde Génération. Cette partie propose une tentative de bilan de ces trente années d'utilisation des satellites qui ont profondément renouvelé la climatologie (Kergomard, 2004). Nous montrerons d'abord pourquoi les données satellitaires sont particulièrement décisives pour l'étude d'une région aussi peu équipée en stations conventionnelles comme le Mato Grosso et où l'expansion des cultures a imposé une « demande climatologique croissante » ; après un récapitulatif des données satellitaires disponibles nous illustrerons notre propos avec l'utilisation des données géostationnaires pour l'estimation des précipitations et des données des satellites SPOT-végétation pour le suivi du couvert végétal et des cultures.

2.1. Agriculture et climat au Mato Grosso : une demande croissante !

Ma réflexion sur le lien entre les données climatiques et les productions agricoles au Mato Grosso est en continuité avec mes études menées pendant ma thèse sur la sécheresse dans la France de l'Ouest. Dans ce dernier cas il s'agissait de voir comment les saisons déficitaires pouvaient avoir un impact variable sur les productions agricoles et notamment les fourrages. Ce type d'approche se poursuit actuellement dans le cadre des travaux menés au sein du GDR-CNRS RICLIM et aussi dans le cadre d'un PRIR au niveau de la Bretagne. Bien sur, au Mato Grosso les contextes climatiques et agricoles sont différents. Cependant, quelques points communs méritent d'être soulignés :

- Au Mato Grosso comme en Bretagne, les trente dernières années ont été l'objet de profondes transformations dans l'agriculture : « révolution agricole » selon le « modèle breton » (Canévet, 1992), la polyculture céréalière traditionnelle étant remplacée par un système intensif basé sur l'élevage-fourrage dans le second cas ; colonisation agricole et diffusion du modèle agricole capitaliste du Sud du Brésil fondé sur le soja dans le premier cas.
- A chaque fois les systèmes traditionnels ont été remplacés par des systèmes productivistes et intensifs basés sur l'exportation (notons au passage qu'une part du soja brésilien sert d'aliment pour les élevages hors-sols bretons !). Cette agriculture pourvoyeuse de devises est un pilier de l'activité régionale et toute « crise » se répercute sur l'ensemble de l'économie ces régions.
- La nécessité d'obtenir des revenus élevés et constants est longtemps passée avant les considérations environnementales au point d'entraîner des conséquences dommageables sur le plan de la qualité de l'eau, de la préservation de la biodiversité ou de l'érosion des sols.
- Surtout, les aléas climatiques sont devenus plus sensibles dans le contexte d'une situation tendue entre rendements agricoles, revenus des producteurs et cours des marchés.

La connaissance climatologique précise pour l'agriculture est donc devenue une impérieuse nécessité pour ces régions. Cependant, la Bretagne, comme le reste de la France, connaît une situation plus avantageuse de ce point de vue avec des observations qui remontent à plus d'un siècle. Au Mato Grosso, la nécessité d'une connaissance climatologique détaillée est un fait nouveau, non pas que la végétation et les communautés indigènes traditionnelles soient insensibles aux conditions climatiques, mais en raison d'un besoin plus clairement identifié pour des besoins économiques et sociaux nouveaux.

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 *saфра*, 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 et récoltée en juin. 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 : 1998 est ainsi considérée comme l'année noire dans les mémoires. Ce sont en fait plusieurs types de manifestations pluviométriques qui peuvent influencer les productions agricoles matogrossense :

- 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.
- L'arrivée de périodes très pluvieuses pendant la récolte : outre les difficultés pour les machines agricoles de travailler sur des sols ou des pistes boueux, le fait de récolter des grains de soja humides nécessite de les passer dans des séchoirs avant le stockage, ce qui a une incidence sur le coût final du produit. En outre, la capacité de séchage étant limitée au Mato Grosso, les camions de soja doivent attendre plusieurs heures voire plusieurs jours avant de pouvoir décharger leur cargaison qui peut alors commencer à moisir avant d'être traitée.
- 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.
- 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 15 quintaux à l'hectare (en 1999 à Campo Novo) contre le double en année pluvieuse (en 1997 à Campo Novo ou en 2001 ou 2003 à Sorriso) comme le montre la figure 2.1.

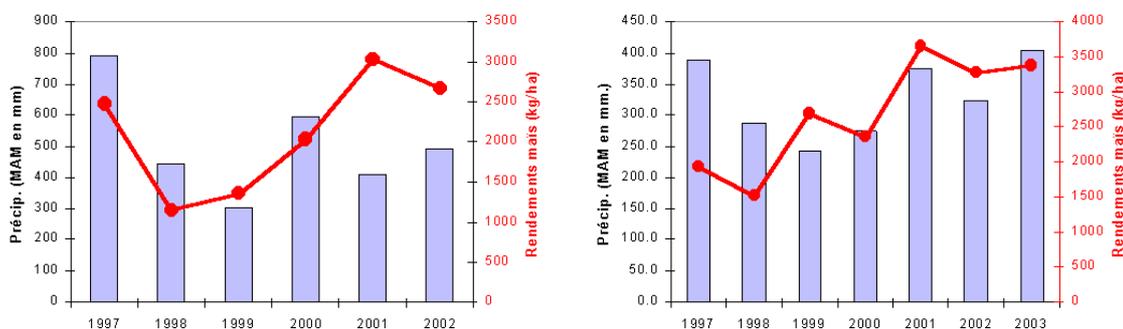


Figure 2.1 : Evolutions comparées des rendements de maïs et de la pluviométrie de Mars-avril-mai à Campo Novo do Parecis (à gauche) et Sorriso (à droite)

Dans la pratique, le lien entre les rendements agricoles et la pluviométrie n'est pas toujours aisé à mettre en évidence (Marchand, 1985 ; Rome, 1998 ; Sultan et al., 2005). En effet le rendement (meilleur indicateur que la production brute qui dépend aussi de la surface cultivée qui ne cesse de s'accroître dans cette région) ne dépend pas que des conditions climatiques. Ainsi l'évolution des rendements de soja dans les principaux municípios du nord du Mato Grosso depuis 1990 (figure 2.2) montre d'abord la progression des rendements liée à l'amélioration des conditions culturales (meilleure préparation des terres, variétés plus adaptées, engrais et traitements croissants,...) et ensuite la chute des rendements des années 1995-96 lors de la crise économique et la mise en place du plan Réal. C'est « seulement » dans le détail de la variabilité interannuelle qu'il faut aller chercher le rôle de pluviométrie.

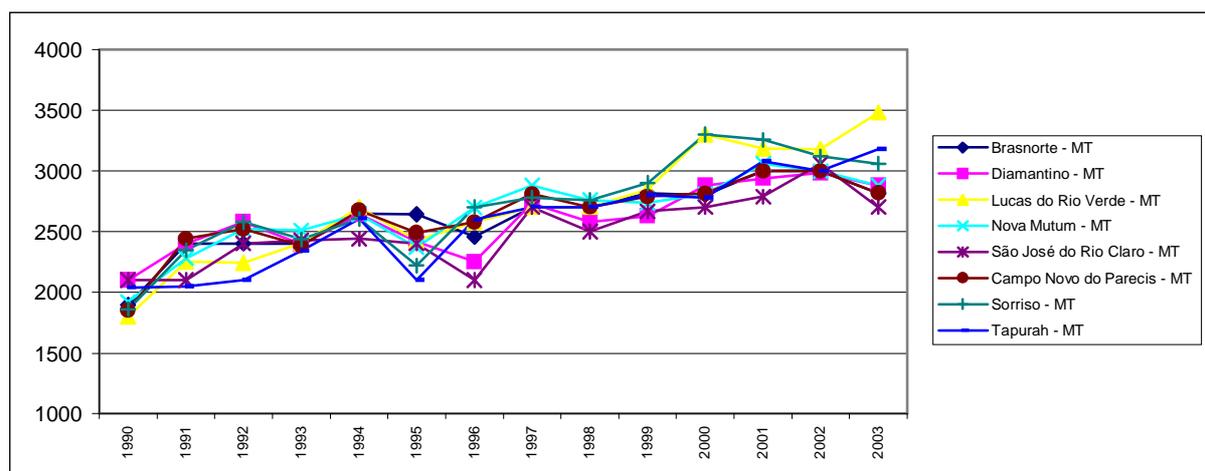


Figure 2.2 : Evolution des rendements de soja (en kg/ha) au Mato Grosso de 1990 à 2003
(source des données : IBGE)

On remarque ainsi que, après les bons rendements de 1997 (27 quintaux par hectare à Diamantino ou São José do Rio Claro), les chiffres sont plus faibles en 1998 (25 quintaux par hectares pour ces deux municípios) en raison de la plus faible pluviométrie enregistrée lors du dernier trimestre 1997 (déficit de 15 à 20% des précipitations). Depuis 2001 le tassement des rendements peut être attribué à plusieurs facteurs : l'épuisement de certaines terres que l'amendement massif n'arrive plus à compenser ; le développement de maladies (rouille asiatique) qui ont pu d'autant mieux se développer que les trois dernières saisons pluvieuses ont été bien arrosées. Finalement, seuls tirent leur épingle du jeu les municípios de Tapurah (où de nouvelles terres mises en valeur plus récemment arrivent en plein rendement) et Lucas do Rio Verde (où les récoltes ont été réalisées plus tôt).

Ces exemples montrent qu'il est illusoire de vouloir trouver une relation linéaire simple entre les rendements d'une culture et une seule variable climatique, les données généralement accessibles étant trop agrégées dans le cas des productions (à l'échelle du município) ou non représentatives dans le cas des relevés pluviométriques (guère plus d'une ou deux stations climatiques pour un município), sans parler de la fiabilité des données qui peut également être sujette à caution (voir plus loin).

Il apparaît, malgré tout, que les contraintes climatiques restent fortes et continuent à rendre aléatoire l'agriculture, première source de revenu de cette région, et ce malgré la volonté politique de faire du Mato Grosso le premier Etat agricole du Brésil. 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.

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

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. 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 baisses des rendements des cultures certaines années. Nous montrerons dans cette partie que l'absence d'un réseau d'observation météorologique de qualité au Mato Grosso, caractéristique propre aux régions peu densément peuplées et récemment mises en valeur, nécessite d'avoir recours à la télédétection pour toute étude climatologique fine.

221. Les lacunes des données d'observation au sol

Jusqu'aux années 1960-70, les données de base utilisées par les climatologues sont des mesures « au sol ». Il s'agit d'observations réalisées dans des stations au sol selon des règles précises imposées au niveau mondial par l'O.M.M. (Organisation Météorologique Mondiale) en France par METEO-FRANCE et au Brésil par l'INMET. Ces données sont donc ponctuelles (stationnelles) et sont à manier avec précaution sur le long terme. Rappelons que pour être comparables ces observations doivent être standardisées (c'est le cas généralement au moins dans un pays donné), par exemple mesurées sous abri à hauteur fixe pour les températures. La qualité des informations disponibles peut donc être très variable en fonction du type de matériel utilisé et de la densité du réseau de mesures, très hétérogène quelle que soit l'échelle considérée.

Les données climatologiques ne sont pas sans poser quelques problèmes quant à leur utilisation (E.R.30, 1981). Il faut tout d'abord souligner la qualité très inégale des observations: erreurs de lectures, défaut des appareils ne sont pas des détails à négliger lorsque l'on étudie des séries de chiffres. On peut, par des méthodes statistiques simples, détecter des erreurs et même parfois les corriger. Il reste que les instruments de mesures se révèlent parfois inadaptés aux conditions atmosphériques violentes: les pluviomètres débordent lors des très fortes pluies (à Nîmes lors de l'orage de 1988), les anémomètres sont emportés par les rafales des cyclones ou des tempêtes comme dans la France de l'ouest en 1987 de sorte que les conditions "extrêmes" ne peuvent pas toujours être convenablement appréciées.

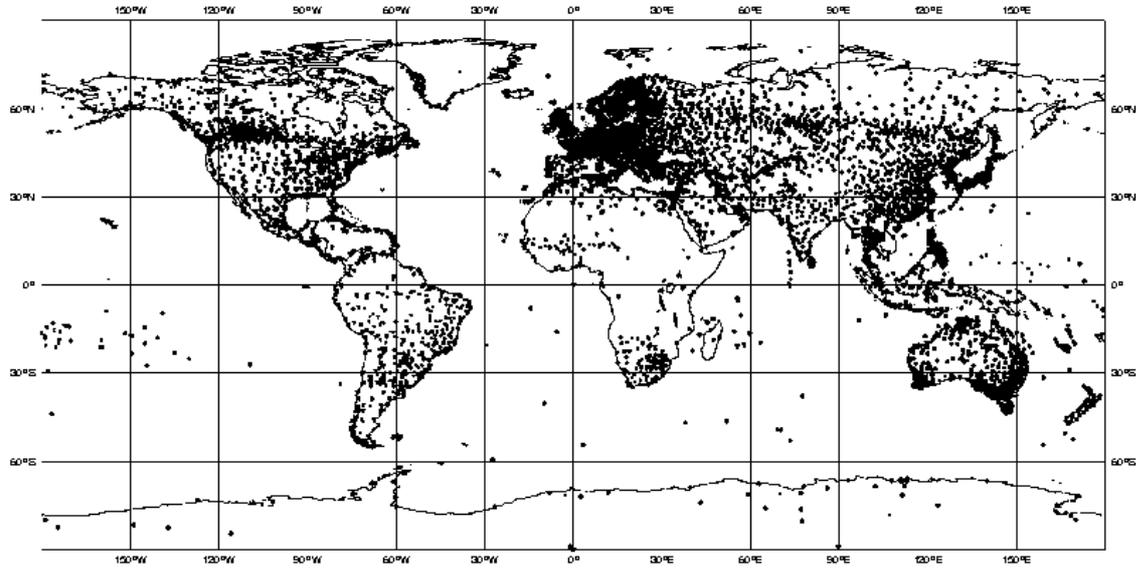
Au-delà de ces remarques "de bon sens", des dérives plus subtiles ont été constatées, liées aux changements d'appareils ou des sites de mesures. Les changements d'appareils (ou de l'heure de la mesure) affectent la continuité des séries observées: on a pu relever des différences substantielles entre les températures mesurées entre les abris en bois et les abris de plastique désormais en fonction. Le changement d'instruments de mesures de l'insolation en France en 1989-1990 a entraîné une rupture dans les séries. On sait aussi que les pluviographes à augets basculeurs sous-estiment les pluies. Il faudrait également tenir compte des changements dans

l'environnement du site où sont effectuées les mesures: l'élévation des températures constatée depuis plusieurs décennies tient aussi au fait qu'elles sont réalisées à l'intérieur ou à proximité des villes. On a même vu des diminutions spectaculaires de pluies ou températures dans des stations où un arbre voisin avait pris trop d'ampleur ou là où un nouveau bâtiment avait été construit... Tout ceci conduit à ne pas se faire d'illusions sur des chiffres trop précis. Une grande prudence et beaucoup de rigueur s'imposent pour l'étude des longues séries de mesures. Mieux vaut se contenter d'utiliser des moyennes sur trente ans (normale climatique) de stations "sûres" gérées par des professionnels, ce qui amène à se poser la question de la densité du réseau de mesures.

Rappelons pour l'Histoire que le premier réseau international de mesure *météorologique* "a été créé par Ferdinand II, grand duc de Toscane; il lança un réseau de dix stations de mesure allant de Florence et Pise à Paris et Varsovie. Le réseau a fonctionné de 1654 à 1667; son arrêt est dû à l'hostilité de l'église catholique face aux entreprises savantes" (Rochas & Javelle, 1993). En France, l'observation météorologique moderne date de la deuxième moitié du XIXe Siècle. Le 14 novembre 1854, en pleine guerre de Crimée, une tempête violente jette sur les côtes de la Mer Noire de nombreux navires de la flotte franco-anglaise... Ce désastre militaire aurait-il pu être évité ? Pour le savoir, l'Empereur Napoléon III demande une expertise à Urbain Le Verrier, scientifique alors unanimement reconnu. Le Verrier montre rapidement que la même tempête a sévi 3 jours plus tôt en France puis dans toute l'Europe... L'évènement était donc prévisible. Quelques semaines plus tard, le 19 février 1855, Le Verrier présente à l'Académie des sciences une "carte du temps" figurant la situation en Europe le matin même. Il profite de la situation de guerre et de la mise en place récente du télégraphe électrique qui permet de faire rapidement circuler l'information en des lieux très éloignés. De cette époque date la création en France d'un "service d'avertissement des tempêtes", ancêtre de "Météo-France". Ailleurs en Europe, de nombreuses créations de commissions météorologiques résulteront d'épisodes de la première guerre mondiale, l'anticipation des conditions météorologiques étant souvent un des éléments de réussite ou d'échec d'une campagne. Ceci est toujours vrai actuellement comme l'a rappelé la Guerre du Golfe en 1991 : le bon déroulement des opérations militaires (y compris des avions furtifs) dépend toujours fortement des conditions météorologiques et climatologiques. Dans certains Etats, l'accès à ces données reste difficile (secret défense !). D'une certaine manière, la prévision météorologique apparaît souvent comme le fruit de la guerre ou « fille de Mars » (C.P.Péguy, 1989) un peu comme la « géographie qui sert à faire la guerre » !

La carte du réseau mondial des quelques 20.000 stations officiellement reconnues par l'O.M.M. est riche d'enseignements (figure 2.3A). Elle montre d'abord la sur-représentation des terres par rapport aux océans (pourtant plus de 70% de la surface du globe) encore mal connus malgré un réseau de 450 bouées dérivantes et des mesures effectuées à bord de 7000 navires. On note en plus une sur-représentation de l'hémisphère nord et surtout des latitudes moyennes: l'observation météorologique peut donc apparaître comme un luxe, un privilège des pays riches ! Cette carte permet de retrouver également les régions de faibles densités humaines (voir la Sibérie et les stations le long du trans-Sibérien). Force est donc de constater que l'information météorologique est discontinue. Pour certaines informations comme celles fournies par les radiosondages la situation est bien pire avec très peu de points (moins de 500 pour tout le globe ; Paillex, 2002) et autant sur l'Allemagne que pour toute l'Afrique, plus sur les seuls USA que sur l'ensemble des océans... Ce problème de la densité du réseau d'information pluviométrique (figure 2.3B) peut être illustré à partir des réseaux du Mato Grosso (907000 km²) et de la France (551000 km²).

Figure 2.3 : Les réseaux d'observation météorologique au sol



A- le réseau d'observation météorologique mondial ; Source : OMM, <http://www.wmo.ch/index-en.html> (juin 2005)



B- Les réseaux de stations pluviométriques du Mato Grosso et de la France (source : Météo-France) à la même échelle.

La connaissance climatologique de la partie méridionale de l'Amazonie brésilienne est très lacunaire (Monteiro, 1951 ; Nimer, 1989 ; Hiez et al., 1992). **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' Energie Electrique), 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.

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 2.4 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 2.4 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, comme l'avait remarqué Marchand (1985) pour l'Irlande, cette répartition spatiale résume l'histoire de la mise en valeur du Mato Grosso et le déplacement du front pionnier du sud vers le nord de l'Etat. 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.

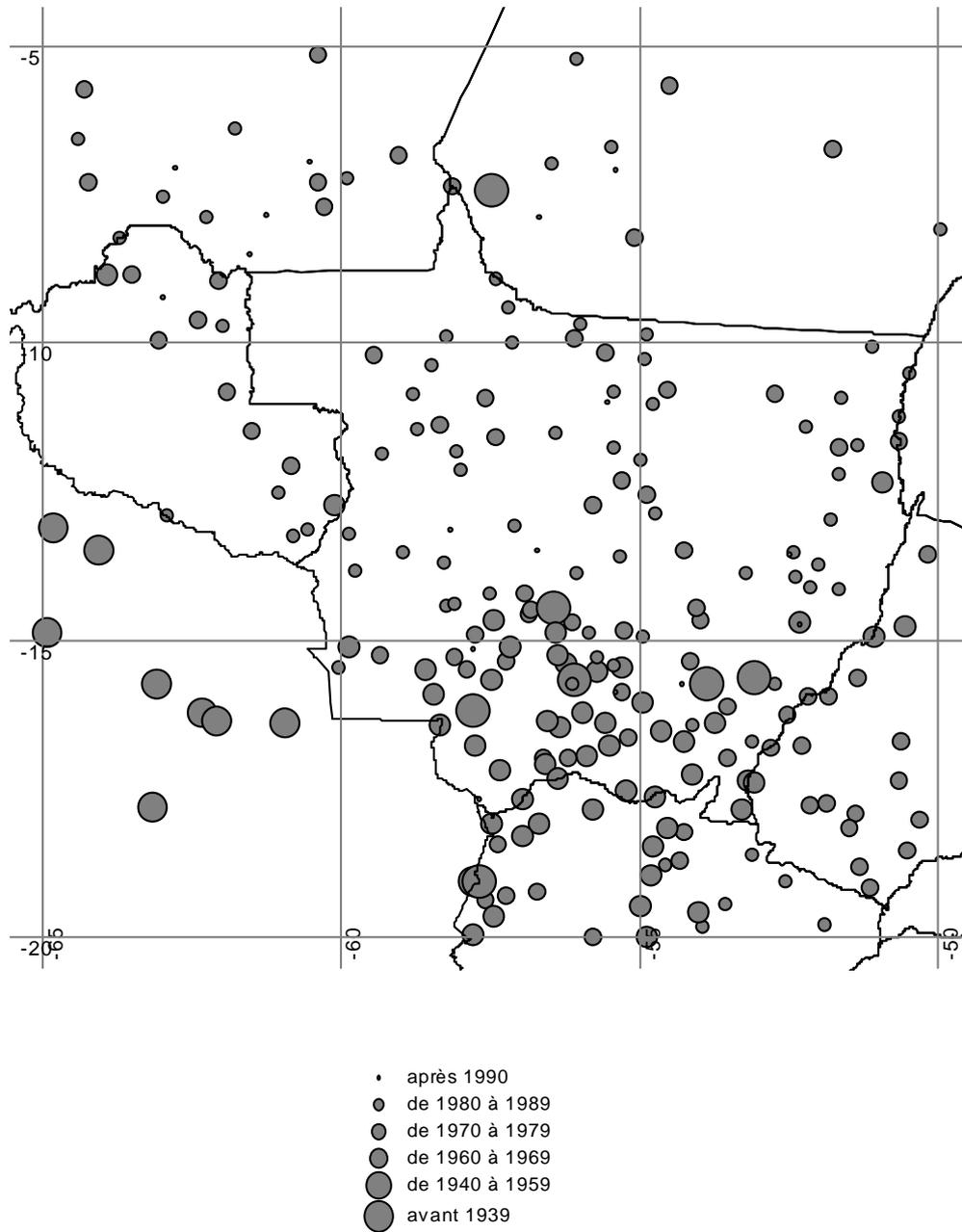


Figure 2.4 : Un marqueur du front pionnier : la date de mise en service des postes pluviométriques du Mato Grosso

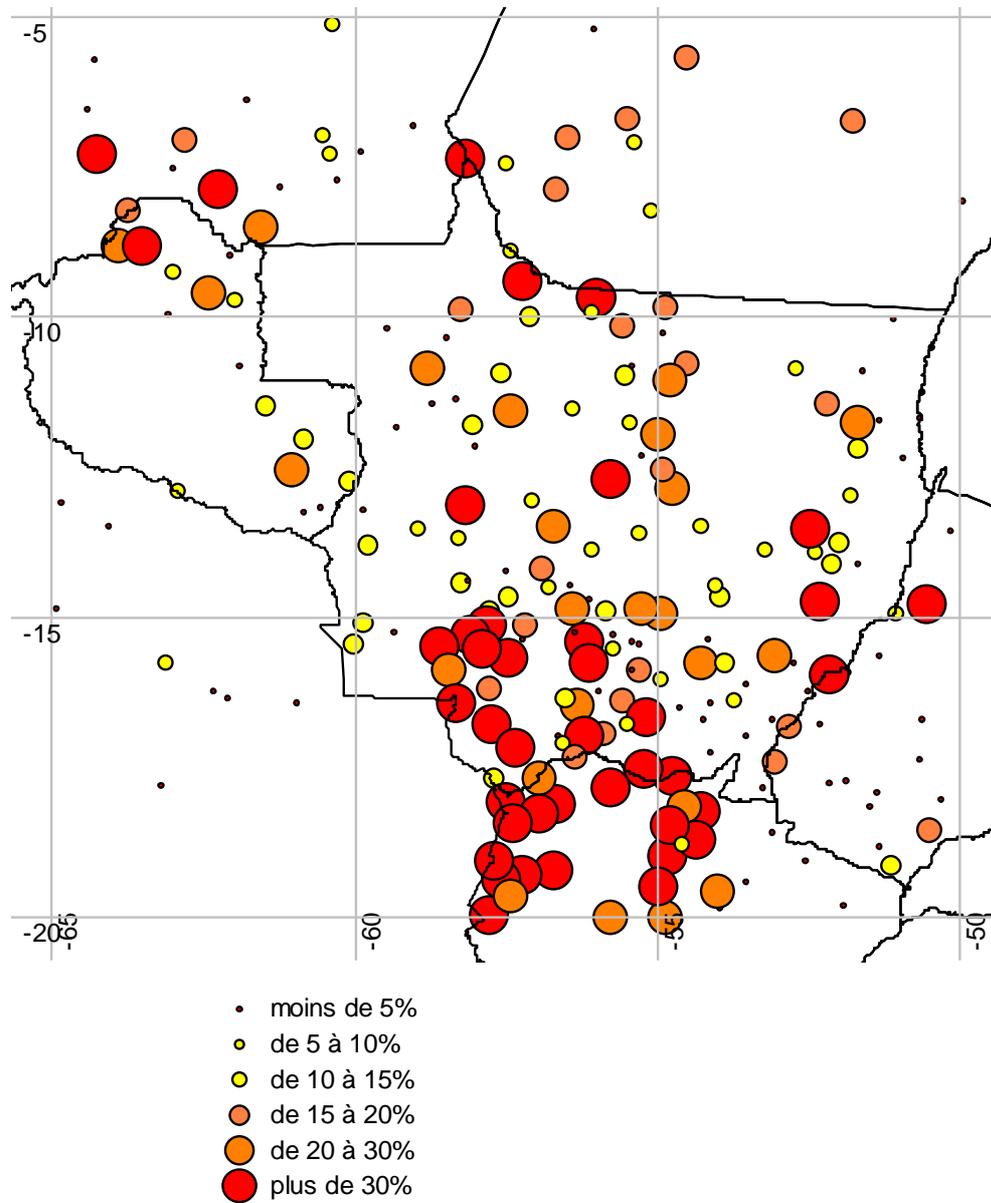


Figure 2.5 : Pourcentage de données manquantes dans les séries pluviométriques

La carte de la figure 2.5 permet de se faire une idée de 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...

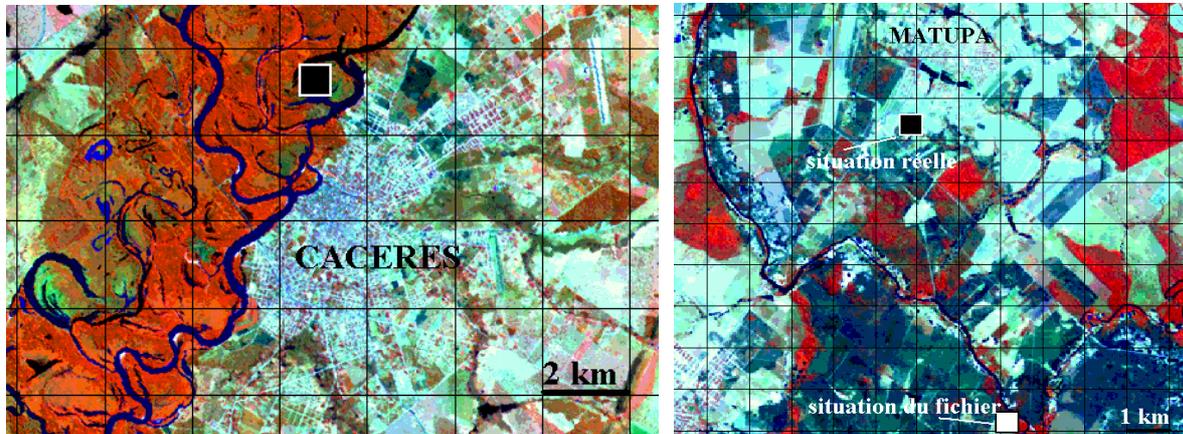
Une dernière remarque concerne la localisation géographique parfois imprécise des stations. Afin de vérifier quels matériels étaient utilisés par les différents organismes nous avons entrepris en 2000, 2001 et 2002 de visiter un certain nombre de postes en fonction des données de localisation fournies par les organismes gestionnaires. **Dans plusieurs cas (environ 20%) la localisation des postes (quel que soit le réseau) était très approximative, avec un décalage de plusieurs kilomètres entre le fichier source et les coordonnées mesurées au GPS** sur le terrain ou à partir de la localisation des points sur une image Landsat. La figure 2.6 montre les localisations improbables ou contradictoires (entre les réseaux ANA et INMET) de stations. 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. Un tel état des lieux permet de comprendre la méconnaissance de cette région sur le plan climatologique traduit par une bibliographie assez peu fournie.

**Photo 2.2 : la station
météorologique de Vera**

Cliché : V.Dubreuil, juin 1997

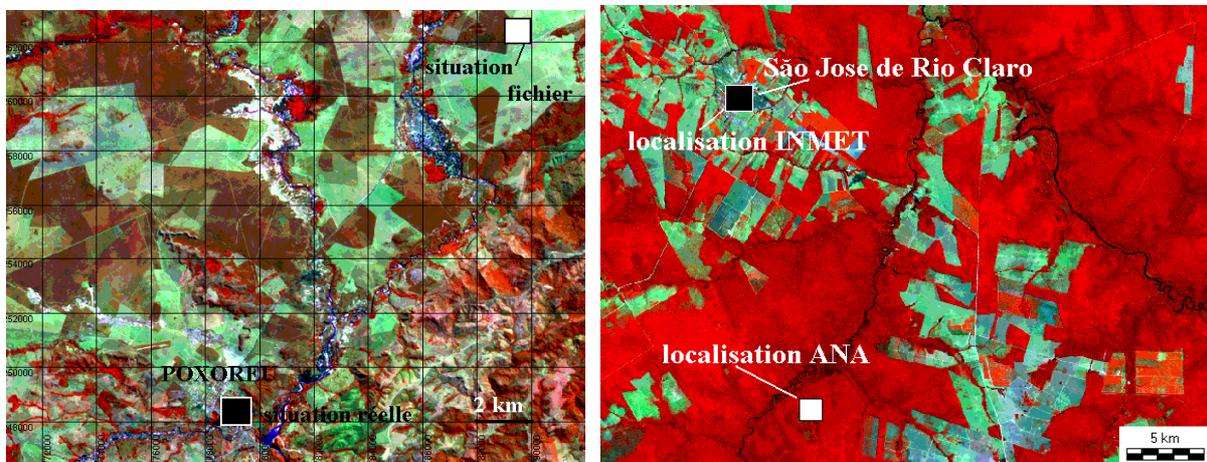


Figure 2.6 : quelques exemples de problèmes de localisation des stations du Mato Grosso
(en arrière plan, les compositions colorée Landsat de 1999)



A- Caceres : localisation de la station improbable au milieu de la varzea du Rio Paraguai à 4 km au nord de la ville

B- Matupa : décalage de 8 km au sud-sud-est de la situation des fichiers sources et la position réelle à proximité de la ville



C- Poxoreu : décalage de 18 km au nord-Est de la situation des fichiers sources par rapport à la position réelle à proximité de la ville

D- São Jose de Rio Claro : écart de près de 20 km entre la position du fichier ANA et celui de l'INMET

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

Au Mato Grosso, le rythme climatique majeur est l'opposition entre la saison sèche (centrée sur juillet) et la saison des pluies qui s'étale de décembre à mars. La région relève des climats tropicaux humides à saisons contrastées du sud du bassin amazonien. Du nord au sud de l'Etat, cependant, un gradient peut être mis en évidence : la saison sèche, courte dans la moitié septentrionale du Mato Grosso, s'allonge vers le sud et vers l'est en même temps que les totaux pluviométriques moyens annuels diminuent. D'une certaine manière, on quitte le milieu équatorial de la forêt pour rentrer dans le monde des savanes.

Il convient de préciser cette transition entre « l'équatorial » et le « tropical ». On avance souvent la différence de régime pluviométrique entre les deux : bimodal pour l'équatorial, monomodal pour le tropical. A l'échelle de l'ensemble du bassin amazonien, les cartes de synthèse établies par différents auteurs montrent la faible représentation des régimes pluviométriques bimodaux : le régime de type équatorial à 2 maxima (mars à juin et octobre-janvier) ne se retrouve que dans certains secteurs de Guyane (très léger repli en février à Cayenne) et de Colombie (dans les vallées intra-andines). Partout ailleurs, c'est le régime tropical à saison des pluies unique d'été qui l'emporte: de mai à octobre pour le Venezuela, de décembre à mai pour le Nordeste, et le reste de l'Amazonie. Selon cette approche on serait donc très loin de faire coïncider climat équatorial et forêt ombrophile, comme, de manière plus large, le monde tropical avec une limite biologique (Lamarre, 2002). C'est que « *l'équatorial est plus difficile à classer que le tropical* » (Demangeot, 1999) et pour Péguy il existe même un « *équatorial confus* ». En fait, « *il n'est pas possible d'affirmer que le tropical est toujours monomodal et que l'équatorial est toujours bimodal* » (Demangeot, 1999). L'équatorial n'est pas non plus forcément plus arrosé que le tropical. Le schéma simple de l'Indonésie ou du littoral de l'Afrique de l'ouest ne convient guère en Amazonie. Pour la majorité des auteurs brésiliens (Nimer, 1989), c'est surtout la présence et la durée de la saison sèche qui distingue les climats dits « équatoriaux » des climats « tropicaux ». Dans presque toute l'Amazonie, il existe un minimum pluviométrique bien marqué (un mois sec) voire une vraie saison sèche (figure 2.7) ; seule fait exception la partie occidentale de l'Etat d'Amazonas (S. Gabriel da Cachoeira), l'extrême sud de la Colombie et le nord du Pérou (Iquitos).

Le Mato Grosso se situe donc à la charnière entre le domaine équatorial et le domaine tropical. 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 (les fameux *friagens* épisodes froids de saison sèche), toujours élevées comme le montrent nos relevés réalisés à Alta Floresta (figures 2.9 à 2.11). 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 2.8) 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).

Figure 2.7 : Les régimes pluviométriques moyens mensuels du bassin amazonien.
(en violet, les initiales des mois secs)

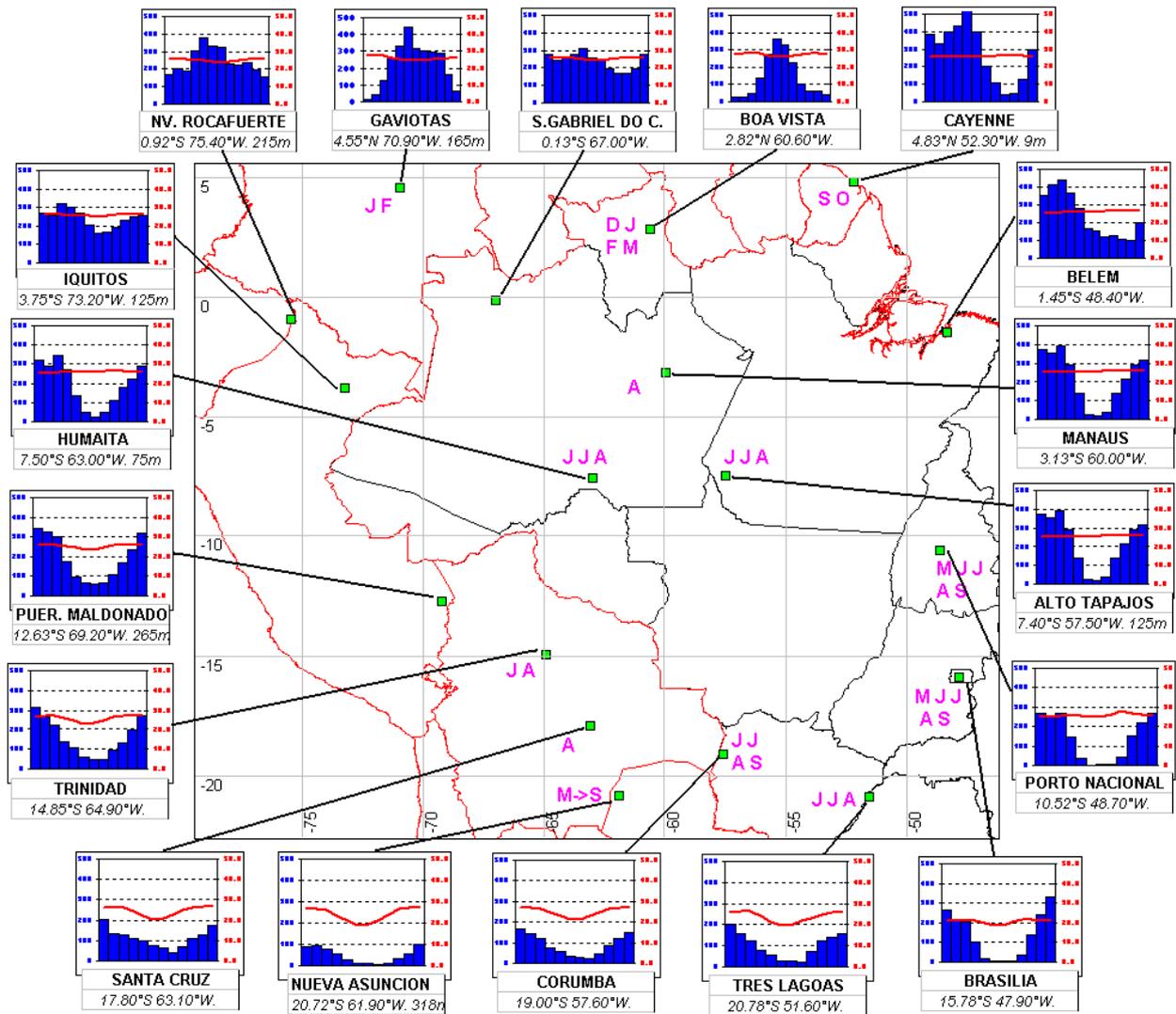
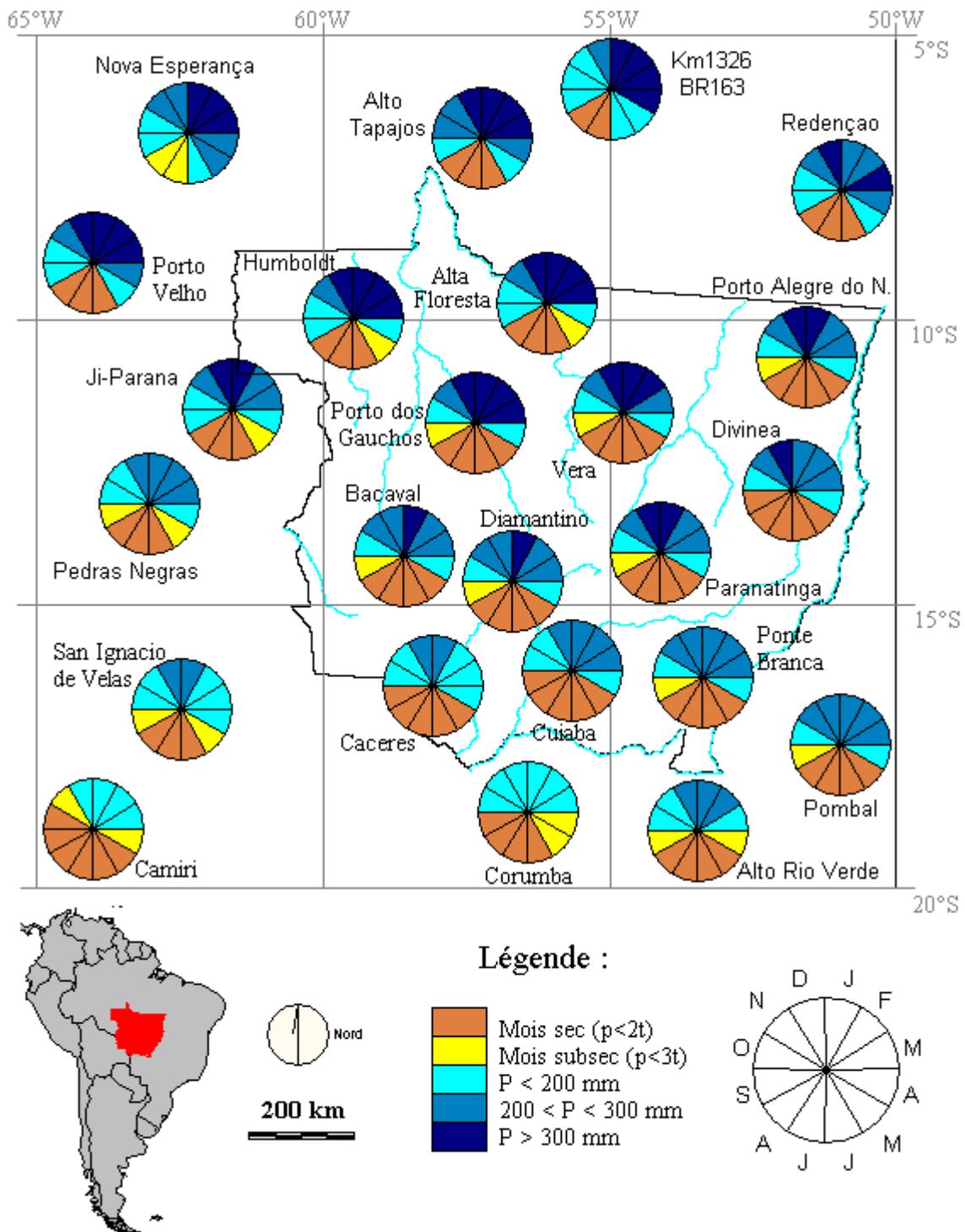


Figure 2.8 : Régimes pluviométriques moyens mensuels au Mato Grosso



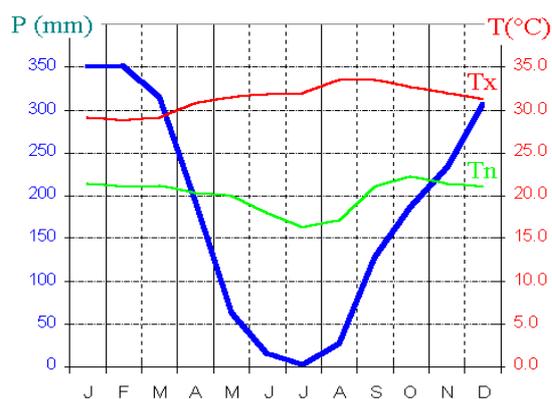


Figure 2.9 : Températures et précipitations moyennes mensuelles (1978-1999) à Alta Floresta (Aéroport).

Précipitations annuelles : 2174mm
 Moyenne des minima (Tn) : 20,1°C
 Moyenne des maxima (Tx) : 31,3°C
 Température moyenne : 25,7°C

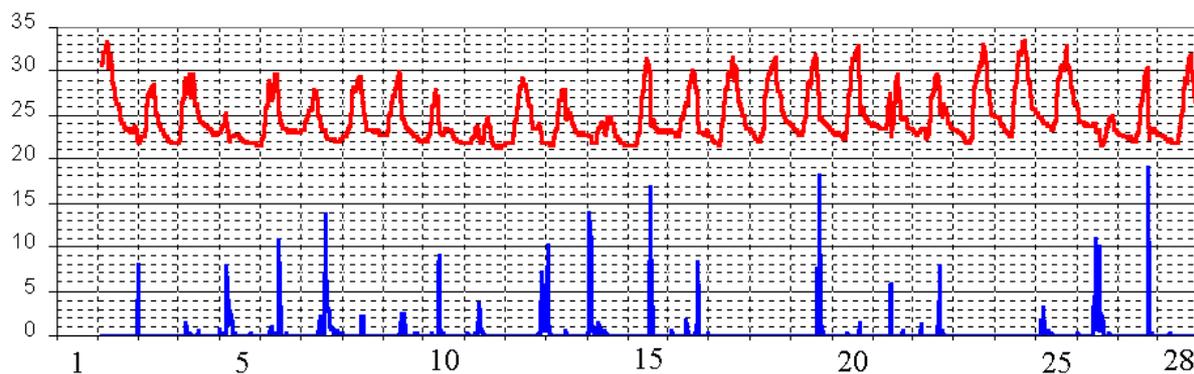


Figure 2.10 : Relevés horaires de températures et précipitations pendant le mois de février 2002 à Alta Floresta (station DAVIS-WM2). Précipitations = 373mm ; Tn=22,2°C ; Tnn=21,3°C ; Tx=30,0°C ; Txx=34,0°C

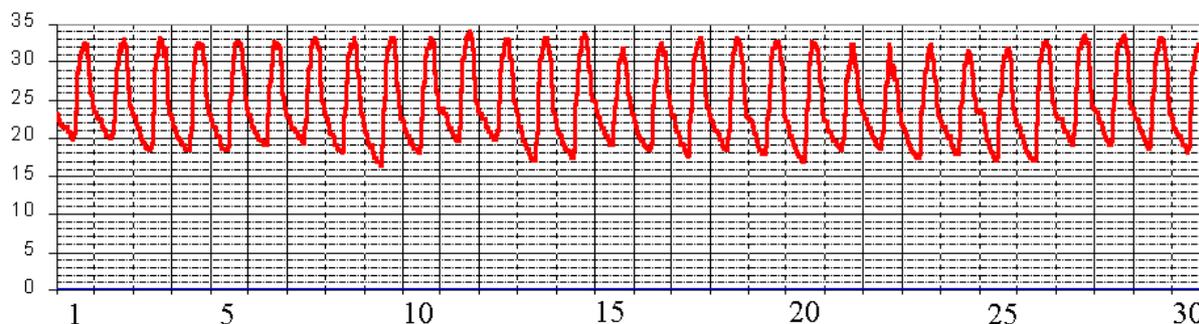


Figure 2.11 : Relevés horaires de températures et précipitations pendant le mois de juin 2002 à Alta Floresta (station DAVIS-WM2). Précipitations = 0mm ; Tn=18,3°C ; Tnn=16,2°C ; Tx=33,1°C ; Txx=34,2°C



Photo 2.3 : Vue partielle de la station DAVIS (Weather Monitor 2) installée dans le parc de l'hôtel Floresta Amazônica d'Alta Floresta. Le pluviomètre a été déplacé sur un bâtiment voisin (avec l'anémomètre) suite au constat des mesures de pluies liées au système d'arrosage automatique de la pelouse (NDVi², juin 2002)

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 sec... 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 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 2.8), 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 200mm diminue rapidement vers le Mato Grosso do Sul et la Bolivie (5 à Diamantino, 4 à Cuiaba, 2 à Caceres, aucun à Corumba). A partir de ces données générales et des cartes de végétation, on peut esquisser le tableau suivant :

Précipitations annuelles	Nombre de mois secs ($p < 2t$)	Végétation naturelle	Type climatique	Station de référence
Plus de 2500mm	2-3	forêt ombrophile dense	Equatorial s.s	Colniza Alto Tapajos
De 2200 à 2500	3	forêt ombrophile ouverte	Subéquatorial	Alta Floresta
De 1800 à 2200	3-4	forêt mésophile	Tropical très humide	Vera
De 1200 à 1800	4-6	cerrados	Tropical « type »	Cuiaba
Moins de 1200	4-6	cerrados	Tropical sub-humide	Corumba

Tableau 2.1 : Synthèse des types de climats au Mato Grosso

Au total, le Mato Grosso relève de l'originalité du dispositif américain pour l'organisation des mécanismes pluviogènes et notamment de la ZCIT, dont le schéma diffère de l'Afrique et de l'Asie et ne permet pas ici d'observer les mêmes dissymétries Nord-Sud et une franche zonation bioclimatique. Certes, le bilan énergétique net annuel fait apparaître un excédent

pour l'ensemble de l'Amazonie du même ordre que celui de la cuvette congolaise (entre 40 et 60 watt.m⁻²) et la région apparaît donc comme une régions source à l'échelle globale. La faible capacité de stockage sur le continent entraîne également une restitution rapide de l'énergie à l'atmosphère sous forme d'une intense activité convective, puis la redistribution de l'énergie sous forme de cellules méridiennes (Hadley) et zonales (Walker) pour rétablir les équilibres entre latitudes et entre façades est et ouest des océans. Cependant, la circulation méridienne d'été austral est marquée par la domination des alizés de NE qui pénètrent loin à l'intérieur du continent en gardant le plus souvent une composante est, sans que l'on puisse donc vraiment parler de mousson. La circulation zonale est marquée par une forte ascendance continentale sur l'ensemble de l'Amazonie (convection) et une convergence de basses couches des flux en provenance de l'Atlantique tandis que la divergence en altitude (anticyclone bolivien) et la subsidence de basses couches concerne l'Atlantique et le Nordeste (Vulquin, 1979). De manière générale, le dispositif topographique amazonien d'une vaste cuvette ouverte sur l'Atlantique avec les reliefs modestes des Guyanes (1280m au Surinam, 2810m au Roraima) du plateau Brésilien (rarement plus de 500m) séparée du Pacifique par des cordillères élevées et continues ont des conséquences décisives : le flux atlantique pénètre à l'intérieur du continent, contrairement au flux pacifique ; « *les fortes précipitations du versant oriental des Andes équatoriales sont d'origine atlantique malgré les distances qui les sépare* » et la « *forme concave de la cordillère à l'ouest favorise la convergence des basses couches* » (Roucou, 1997).

Un autre fait important est le rôle essentiel joué par les forêts tropicales sur le système climatique, idée déjà ancienne puisque « *au XVIIIe siècle, Buffon affirmait que les forêts font pleuvoir* » (Demangeot, 1999) : on estime ainsi qu'en Amazonie « *80 à 90% de l'énergie radiative disponible sont utilisés pour l'évapotranspiration. Il reste entre 10 et 20% pour réchauffer l'air ambiant.* » (Molion, 1987). Dans cette région, le flux de transfert de chaleur latente est donc très supérieur au flux de chaleur sensible. En outre, en Amazonie le flux d'évapotranspiration correspond en moyenne à 50% de la pluviométrie, ce à quoi il convient d'ajouter le rôle d'interception de la canopée : « *l'eau précipitable contenue dans la colonne atmosphérique de la station de Tabatinga, pourtant à 2500 kilomètres de l'Atlantique, est ainsi supérieure à celle de la station de Belem, près de la côte. Une partie de l'humidité de l'atmosphère provient alors de la vapeur d'eau recyclée par la forêt* » (Durieux, 2002).



Photo 2.4 : début d'organisation de la convection au-dessus de Cuiaba en fin de matinée (V.Dubreuil, mars 2004)

Plusieurs études ont montré la sensibilité des précipitations de cette région aux forçages océaniques et notamment à l'ENSO (Ronchail et al., 2002). En phase positive de l'ENSO, de décembre à février, on observe généralement une diminution des précipitations sur l'est de l'Amazonie (de l'Amapa au Roraima) et au Nordeste. Mais « *ces anomalies peuvent varier d'un événement à l'autre et doivent être considérées uniquement comme des tendances* » (Durieux, 2002). En outre, contrairement aux autres régions du continent, l'Amazonie méridionale « *entretient des relations faibles et peu significatives avec les modes océaniques* » (Roucou, 1997). Cet aspect ne sera donc pas abordé dans ce travail.

Plus importante est la forme sous laquelle se développent les précipitations : « *la majeure partie des nuages convectifs des régions tropicales est organisée en systèmes convectifs de méso-échelle (SCM)* » dont la taille minimale dépend des auteurs (entre 3500 km² et 10000 km²). Le plus souvent organisés en lignes de grains avec un front nuageux de 700 à 1900km de long et une largeur de 100 à 220km, leur durée de vie varie de 6 heures à quelques jours : « *les lignes de grains contribuent à 45% des précipitations du Nord-Est de l'Etat du Para durant la saison des pluies* » et dépendent du positionnement de la ZCIT tandis que « *la formation de systèmes convectifs d'échelle plus limitée dépend essentiellement des conditions d'instabilité locale et du cycle diurne* » (Durieux, 20002). Ces derniers systèmes représentent moins de 20% du total des précipitations mais semblent plus fréquents dans le sud du bassin amazonien et sont soumis à une plus forte variabilité spatio-temporelle.

Enfin, si de nombreuses études ont cherché à expliquer l'origine et les causes de la variabilité interannuelle des précipitations en Amazonie, peu d'études ont été consacrées à une étude détaillée de la distribution spatiale de celles-ci. Or c'est le plus souvent cet aspect qui importe pour les activités humaines (agriculture). Cependant, 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.

2.3. Climat et satellites : la diversité des méthodes et données satellitaires disponibles pour l'étude du climat et notamment l'estimation des précipitations

231. Un développement progressif de techniques maintenant opérationnelles

L'importance des satellites en climatologie et météorologie dépasse le cadre de la recherche. Leur utilité n'est plus à démontrer pour de nombreuses activités économiques (agriculture, pêche, ...). Le suivi et la prévision des conditions météorologiques (en cause dans 20% des accidents de la route en France) conditionnent notre vie quotidienne et les images des satellites météorologiques sont largement diffusées dans le public (pas de bulletin météorologie télévisé sans animation satellite !). Plus encore que les autres images satellites, celles fournies par les satellites météorologiques sont des produits de tous les jours (Bader et al., 1995 ; Rainer, 2003).

Dès l'origine de la télédétection satellitaire l'observation de l'espace de l'atmosphère terrestre a été une priorité. Certes, des années 1960 jusqu'à la fin des années 1980, l'essentiel des satellites sont de type militaire: sur la cinquantaine de lancement annuels 80% sont des satellites d'observation stratégique et seulement 2 à 4 pour l'observation civile (notamment les programmes Landsat et SPOT). Mais déjà, pendant ces trois décennies, les lancements de satellites météorologiques sont importants, en moyenne 5 à 6 par an. Depuis 1991 et la fin des régimes soviétiques et communistes d'Europe de l'Est, les satellites météorologiques et d'observation civils l'emportent sur les satellites militaires mais avec 2 fois moins de lancements et une plus grande diversité des pays lanceurs : les pays « pionniers » (USA, Russie) sont ainsi concurrencés par l'Europe, le Japon puis par les pays émergents comme la Chine, le Brésil, l'Inde ou Israël qui se dotent également de programmes spatiaux (Verger, 1992). Le recul sur ces quarante cinq années d'observation satellitaire de notre planète permet de distinguer quatre phases successives d'une dizaine d'années chacune.

. Les phases du développement de la télédétection météorologique

Les prémices de la télédétection météorologique remontent à l'après deuxième guerre mondiale : en 1947, les Américains reconvertissent des fusées V2 en lanceurs équipés d'appareils de mesures et caméras optiques. Les premières photographies de systèmes nuageux de l'espace datent de cette époque, les appareils de prises de vues étant emportés jusque vers 110-165 km d'altitude. Bien que l'on ne puisse pas encore parler de satellite, ces observations révèlent la complexité des systèmes nuageux (à l'ère de la frontologie norvégienne) et l'intérêt d'une vue globale de ces systèmes. L'ère de la télédétection météorologique satellitaire commence vraiment après Spoutnik (octobre 1957) et la création de la NASA en mars 1958 (*National Aeronautics and Space Administration*) qui lance le premier satellite météorologique pour l'estimation du budget radiatif terrestre: "*First Earth Radiation Experiment*". Mais la date importante est surtout le **1er avril 1960 avec le lancement de TIROS-1 (*Television and InfraRed Operating System*)**, premier véritable

satellite météorologique qui démontre la complexité et l'intérêt de l'approche satellitaire (d'une certaine manière il pose plus de problèmes aux météorologues qu'il ne répond aux questions) et la nécessité d'une approche globale et d'une coopération internationale pour la surveillance globale de l'atmosphère terrestre. C'est ainsi que sont mis en place (Résolution de l'ONU de décembre 1962) le *World Weather Watch* sous l'égide de l'OMM et le « *Global Atmospheric Research Programm* » (GARP). Les années 1960 sont celles de la première génération des satellites défilants TIROS (10 appareils du même type jusqu'en 1965 sur des orbites inclinées de 48 à 58° par rapport à l'Equateur ne couvrant que les basses et moyennes latitudes) puis ESSA (*Environmental Science Services Administration*). Les 9 appareils ESSA (lancés de 1966 à 1969) ont désormais des orbites quasi-polaires et observent également les pôles. Ils montrent la faisabilité opérationnelle des capteurs et des systèmes de transmission APT (*Automatic Picture Transmission*) et « *stockage on board* » (données récupérées par les stations au sol de Virginie et d'Alaska). Coté russe, le premier satellite météorologique, COSMOS-122, est lancé en 1966 et METEOR-1, en 1969, est le premier satellite opérationnel muni d'un système d'observation TV.

La décennie 1970 est celle de la mise au point et de la maturité des systèmes d'observations météorologiques. Malgré les difficultés économiques, le prestige de la NASA avec les missions Appolo permet de développer de nouveaux programmes plus opérationnels. Il faut souligner d'abord le développement des plate-formes géostationnaires au milieu des 70's : lancement de GOES-1 en 1974 puis de METEOSAT-1 et GMS-1 en 1977. Du coté des satellites défilants, une deuxième génération apparaît avec ITOS (*Improved Tiros Operational System*) lancé en janvier 1970 avec double système de transmission (APT + stockage) et des résolutions spatiales de 1 à 4 km dans le visible et l'infrarouge ; le n°2 (décembre 1970) est rebaptisé NOAA-1, la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), successeur de l'ESSA, étant désormais rattachée au « *US department of commerce* » montrant l'entrée des images des satellites météorologiques dans le domaine opérationnel et... commercial. Cette première série de satellite NOAA est équipée du radiomètre VHRR (*Very High Resolution Radiometer*) et d'un sondeur vertical de température. En 1975, la deuxième génération des METEOR russes embarque également un radiomètre imageur. Notons également qu'à cette époque sont mis en orbite les premiers satellites d'observation de la terre à haute résolution (LANDSAT MSS en 1972 avant SPOT en 1984).

Un tournant important s'opère en 1978 avec l'arrivée d'une nouvelle génération des NOAA : le radiomètre AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) sur TIROS-N lancé en 1978, observe la surface terrestre dans 4 bandes spectrales : 0.55-0.90 μ m, 0.73-1.1 μ m, 3.5-3.9 μ m et 10.5-11.5 μ m. A partir de NOAA-6, la bande passante du canal 1 a été réduite pour mieux discriminer les couverts neigeux (0.55-0.7 μ m puis 0.58-0.68 μ m): ainsi ont pu également être calculés à partir de 1980 des indices de végétation combinant les informations du canal 1 et du canal 2, proche infrarouge (Dubreuil et al., 2002). A partir de NOAA-7, enfin, un cinquième canal a été ajouté (11.5-12.5 μ m) afin de fournir de meilleures estimations des températures de surface de la mer (Tucker, 1996). Cette configuration de 5 canaux équipant le radiomètre AVHRR est toujours en place sur NOAA-17 lancé en 2002. L'année 1978 est aussi celle où sont lancés toute une série de plates formes expérimentales comme SEASAT et NIMBUS. Surtout, la décennie qui suit est celle où les programmes opérationnels sont en place de façon pérenne, pour la plupart jusqu'à aujourd'hui : une certaine « routine » s'installe. En parallèle de gros efforts sont réalisés pour l'intégration des données satellitaires dans les modèles de prévision météorologiques : en août 1979 au CEPMMT de Reading est réalisée la première utilisation quotidienne d'un modèle global et

l'intégration des données de vent issues des géostationnaires (Pailleux, 2002). D'une certaine manière, l'effort porte sur le développement des modèles et semble laisser au second plan la technologie spatiale météorologique, le tout dans une nouvelle perspective scientifique centrée sur le "global-change" où l'on perçoit mal au début l'apport de la télédétection.

Ainsi, les années 1990 apparaissent marquées à la fois par une série de difficultés et l'arrivée d'une nouvelle génération de capteurs. Les difficultés des programmes satellitaires sont de natures diverses : explosion de la navette spatiale Challenger au décollage en 1993, difficultés de mise au point de la série GOES-next (système de stabilisation sur 3 axes), échec de la mission LANDSAT 6, perte de NOAA-13 en 1993 au bout de 13 jours ... Mais, dans le même temps, de nouveaux systèmes d'observation sont mis en place : radars imageurs et altimétriques (TOPEX Poseidon, ERS,...), instruments dédiés à l'observation océanique et aux interactions océan/atmosphère (POLDER, AQUA,...), instruments de sondage atmosphérique plus performants (ATOVS sur NOAA-15). Les résolutions spatiales (désormais métriques) et spectrales (plusieurs dizaines de canaux) s'affinent. L'évolution concerne également l'observation géostationnaire avec la nouvelle série des GOES américains (1994) et l'arrivée de Météosat Seconde Génération (MSG). Sur le plan thématique, il faut signaler les recadrages qui s'opèrent également pendant cette période. En effet, les séries de données satellitaires commencent à être "climatologiquement" exploitables car les observations durent depuis la fin des années 1970 soit environ 20 ans d'observation pour les produits NOAA ou GOES. On observe également une importance croissante des données satellitaires pour des approches globales de l'atmosphère, des océans, de la biosphère (continentale et marine), de la cryosphère, etc... (Gurney et al., 1993).

Au final, la technologie météorologique spatiale a permis sur une quarantaine d'années un profond renouvellement des approches et des méthodes de travail des climatologues et des géographes et ce d'autant plus qu'une grande quantité de données issues d'une variété de capteurs est accessible pour la communauté scientifique.

. La diversité des capteurs et des images disponibles

Les satellites météorologiques constituent la part la plus importante des satellites d'observation de la Terre (Burroughs, 1991). On distingue classiquement les satellites géostationnaires des satellites défilants : nous détaillerons leur utilisation au Mato Grosso dans les deux parties suivantes. Outre les satellites opérationnels géostationnaires et défilants, de nombreux programmes satellitaires météorologiques ont été réalisés depuis les années 1960. Parmi les programmes les plus représentatifs on peut mentionner les satellites NIMBUS (suivi de l'ozone et mise au point de capteurs), TOPEX-POSEIDON (radar altimétrique), DMSP (satellites militaires avec un capteur micro-ondes pour les précipitations), TRMM (premier radar de précipitations embarqué)...

L'intérêt des satellites météorologiques est devenu évident depuis l'heureuse prévention réalisée lors du passage du cyclone Camille (un des plus puissants du siècle) sur le sud-est des Etats-Unis en 1969: l'alerte donnée à cette époque suite aux observations satellitaires a sans-doute épargné la vie à des centaines de personnes. L'avantage des satellites provient surtout de la fréquence de leurs observations et du suivi de la dynamique spatiale des phénomènes météorologiques (perturbations). Il est devenu possible dès les années 70 d'obtenir une spatialisation des données thermiques et des couvertures nuageuses si importantes pour la connaissance du climat et la prévision météorologique. On estime ainsi que les satellites ont

permis d'accroître de 2 jours la période de prévision considérée comme fiable (5 jours). Parmi les nombreuses utilisations courantes des produits satellitaires en climatologie on peut retenir le programme ISCCP (suivi de la couverture nuageuse), l'estimation des précipitations à partir des données METEOSAT, le suivi de la sécheresse, le suivi du phénomène el-nino,...

Les satellites géostationnaires assurent depuis 1977 une couverture quasi-complète du globe terrestre (hautes latitudes exclues). Un ensemble de cinq satellites sont chargés d'effectuer un suivi régulier de la situation météorologique pour toute la planète. Ainsi, les satellites METEOSAT, réalisés par l'Agence Spatiale Européenne (E.S.A.), observent le fuseau Europe-Afrique, les satellites américains GOES observent les fuseaux Amérique-Atlantique et Amérique-Pacifique, les satellites japonais GMS le fuseau Asie-Pacifique-Océanie, le fuseau Asie-Océan Indien étant observé par des missions russes (GOMS), indiennes (INSAT) ou chinoises (FY-2). Dans tous les cas, il s'agit d'engins géostationnaires, c'est à dire qu'ils paraissent fixes par rapport à la surface de la Terre (ils se déplacent en même temps qu'elle à 36 000 km d'altitude). Alors que la résolution spatiale est longtemps restée de l'ordre de 5 à 10 kilomètres et avec une résolution temporelle, horaire ou semi-horaire, depuis une dizaine d'années, les programmes géostationnaires ont connu de profondes améliorations. Ainsi, depuis 2002, le programme METEOSAT est entré dans une nouvelle phase avec le lancement de MSG (Météosat Seconde Génération). Les performances sont accrues avec une résolution désormais kilométrique dans le visible (comme pour les GOES américains depuis 1994), une fréquence d'acquisition d'image toutes les 15 minutes et de nouvelles bandes spectrales.

Tableau 2.2 : Comparaison des performances de Météosat et MSG :

	Météosat	MSG
Visible	un canal (5 km)	4 canaux dont HRV à 1 km
Infrarouge moyen	un canal (10km)	3 canaux (3km)
Infrarouge thermique	un canal (10km)	5 canaux (3km)
Répétitivité des images	30 minutes	15 minutes

La haute fréquence d'acquisition d'images permet de produire des animations sur la journée (cf bulletins TV) le mois ou l'année. Ils sont des éléments clés de la prévision météorologique moderne car ils permettent de recomposer les mouvements de l'atmosphère (champ de vent) à partir de l'observation continue des formations nuageuses. Les premiers éléments de notre atmosphère qu'observent les satellites sont en effet les nuages. En 1983 a débuté le programme ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Program* ; Schiffer & Rossow, 1983) : il s'agissait de constituer une base de données globales pour l'étude des nuages à partir des données (visible et infrarouge) satellitaires géostationnaires et défilants. Les synthèses sont réalisées à l'échelle de l'ensemble du globe toutes les 3 heures et à des résolutions différentes (30 kilomètres à 2°5). Des synthèses mensuelles sont également disponibles. A l'échelle régionale et locale, plusieurs études ont utilisé les données satellitaires pour réaliser des suivis de la couverture nuageuse (Mounier & Lozac'h, 1981 ; Poissonnier, 1991). Nous illustrerons notre propos à partir de l'étude du lien entre données pluviométriques au sol et signal satellitaire dans le Mato Grosso.

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

. 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. A l'heure actuelle, les jeux de données les plus anciens sont les bases ISCCP (voir plus haut), OLR («*Outgoing Longwave Radiation*», depuis juin 74 un seuillage dans l'IRT à 240W/m^2 puis une moyenne sur 5 jours à une résolution de $2^\circ \times 2^\circ$ entre 30°N et 30°S est réalisée ; Ferreira & Gurgel, 2002) et HRC («*Highly Reflective Cloud*», suivi de janvier 71 à décembre 87 à partir des images visible des systèmes convectifs de plus de 200km identifiés puis discriminés dans l'IRT et synthétisés chaque jour à $1^\circ \times 1^\circ$ entre 25°N et 25°S). En fait, 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 de surestimer les nuages pluviogènes 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*). 25 satellites DMSP ont été lancés sans discontinuer depuis 1966 : leurs produits n'ont longtemps été disponibles qu'en documents photo et pas numérique car leur vocation première était de fournir des informations à l'armée américaine. Il s'agit en fait d'appareils proches des NOAA avec des mesures dans le visible (0,4-1,1 μ m) et l'infrarouge (10,5-12,5 μ m). Depuis 1987, ils embarquent surtout le capteur SSM/I qui prend des mesures dans 4 fréquences micro-ondes (19, 22, 37 et 85GHz) avec une résolution de 30 km environ. Ils permettent donc un suivi du contenu en eau des nuages et des précipitations avec d'assez bons résultats sur les Tropiques et l'Amazonie (Negri et al., 1999). Les inconvénients de ces méthodes micro-ondes 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).

La mission spatiale radar TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, Simpson et al., 1988) est une mission américano-japonaise lancée le 27 nov.1997 depuis la base japonaise de Tanegashima. L'orbite circulaire à 350km d'altitude entre 35°N&S. permet de suivre de façon détaillée les régions tropicales. A son bord, se trouvent plusieurs appareils et notamment :

- LIS : *Lightning Imaging Sensor*, caméra et filtres ne recevant que la lumière des éclairs (une première quantification révèle que 90% des éclairs se produisent au dessus des continents).
- le premier radar de précipitations embarqué dans l'espace avec lequel une meilleure connaissance tridimensionnelle des systèmes pluvio-gènes a pu être obtenue mais, là aussi, sur une surface et un laps de temps réduits (Angelis et al., 2004).

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), Bergès (2003), Bergès & Chopin (2004) 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.

. 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 infrarouges fournies par les satellites géostationnaires sont réalisées depuis

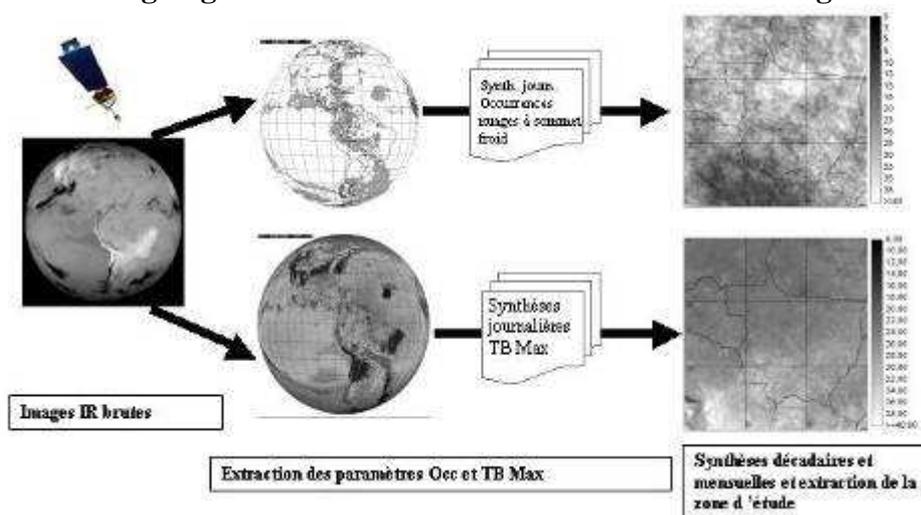
longtemps (Arkin et Janowiak, 1993 ; Guillot et al., 1994). Les tests et validations ont cependant surtout privilégié l'échelle continentale (l'Afrique, l'Amérique). Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser les données infrarouges GOES à pleine résolution (4km) pour essayer de proposer une cartographie 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'équateur à 75° de longitude ouest. Les informations retenues sont celles du canal 4 (10,2-11,2um) à partir desquelles 2 jeux de données ont été réalisés (figure 2.12):

- 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 (Tmax) 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 Tmax 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 *Goies 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.

Nous présentons ici les résultats mensuels obtenus pour la période de septembre 1999 à août 2001 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 412x412 pixels.

Figure 2.12 : organigramme des traitements effectués sur les images GOES



2.4. utilisation des synthèses infrarouge GOES pour le suivi des pluies de 1999 à 2001

241. Suivi de la saison des pluies 1999-2000 et 2000-2001

Les images des figures 2.13 à 2.18 permettent de suivre le développement des occurrences des nuages à sommet froid et des Tmax en relation avec celui des précipitations dans le Mato Grosso. Le mois de septembre est généralement considéré comme celui qui clôt la saison sèche avec l'arrivée des premières pluies. En 1999 et 2000, on constate effectivement la présence d'un fort couvert nuageux convectif au-dessus d'un bon tiers nord de l'Etat et les pluies ne se généralisent qu'à partir des mois d'octobre et novembre. Parallèlement les Tmax amorcent une baisse sensible d'une bonne dizaine de degrés en deux mois (de septembre à 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 et 2000, 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 et de novembre 2000 à mars 2001, 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 expriment 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 connues. 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. En 2001 c'est l'ensemble du mois de février qui apparaît nettement moins arrosé (35mm à Cuiaba pour une moyenne de 202mm, 193mm à Vera pour une moyenne de 339, 170mm à Matupa pour une moyenne de 340mm...). De janvier à mars, les sols gorgés d'eau et la végétation en plein développement expliquent les basses Tmax enregistrées (20 à 25°C) ; on remarque cependant que les secteurs de production de soja du centre de l'Etat (Sorriso, Chapada dos Parecis) se distinguent déjà par une remontée des Tmax dès les mois de février-mars du fait de l'importance des sols nus suite aux récoltes de janvier-février.

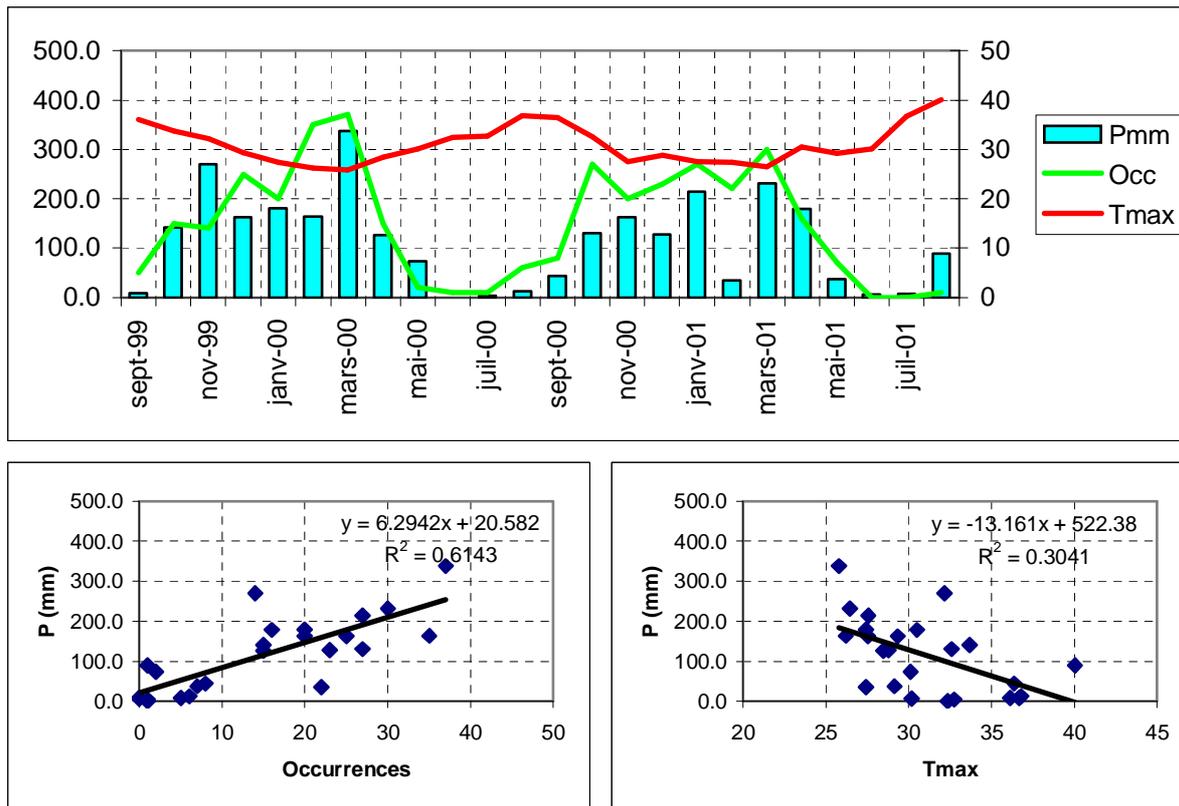


Figure 2.13 : suivi des précipitations, occurrences et Tmax à Cuiaba 1999-2001

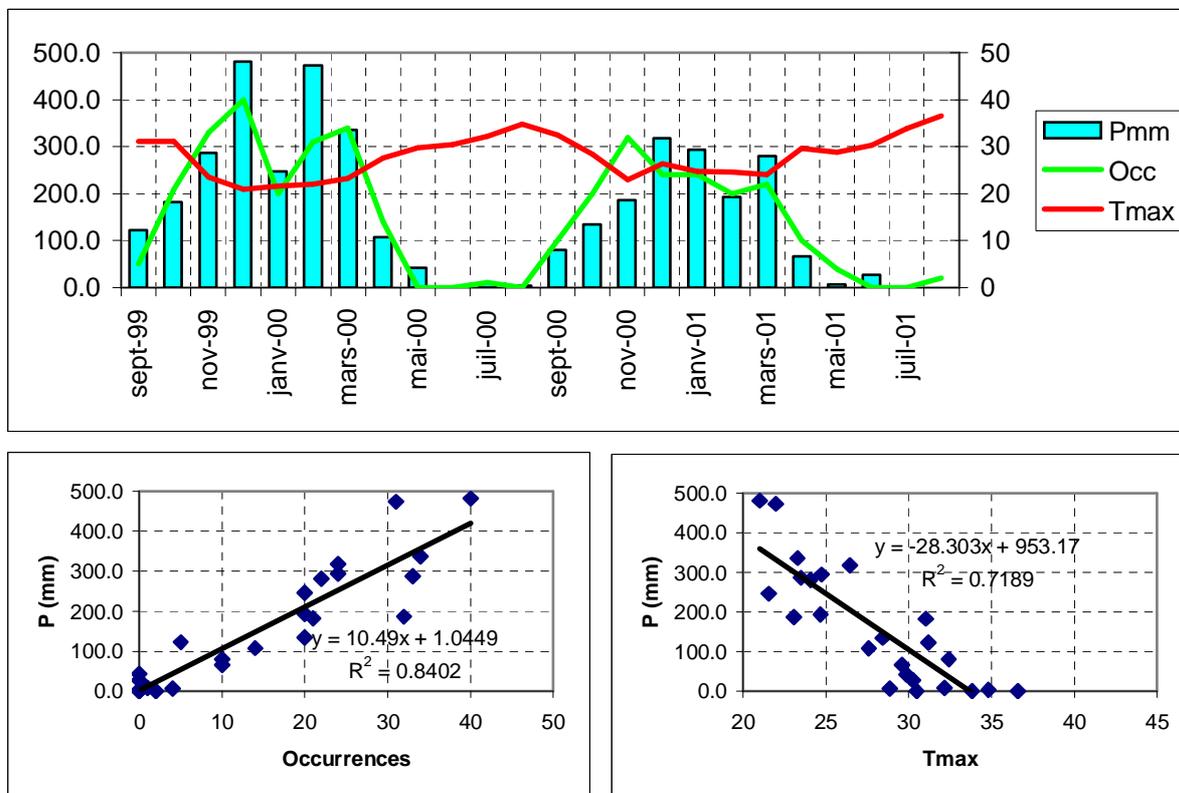


Figure 2.14 : suivi des précipitations, occurrences et Tmax à Vera 1999-2001

Figure 2.15 : Synthèses mensuelles GOES des TMax de sept.1999 à août 2000

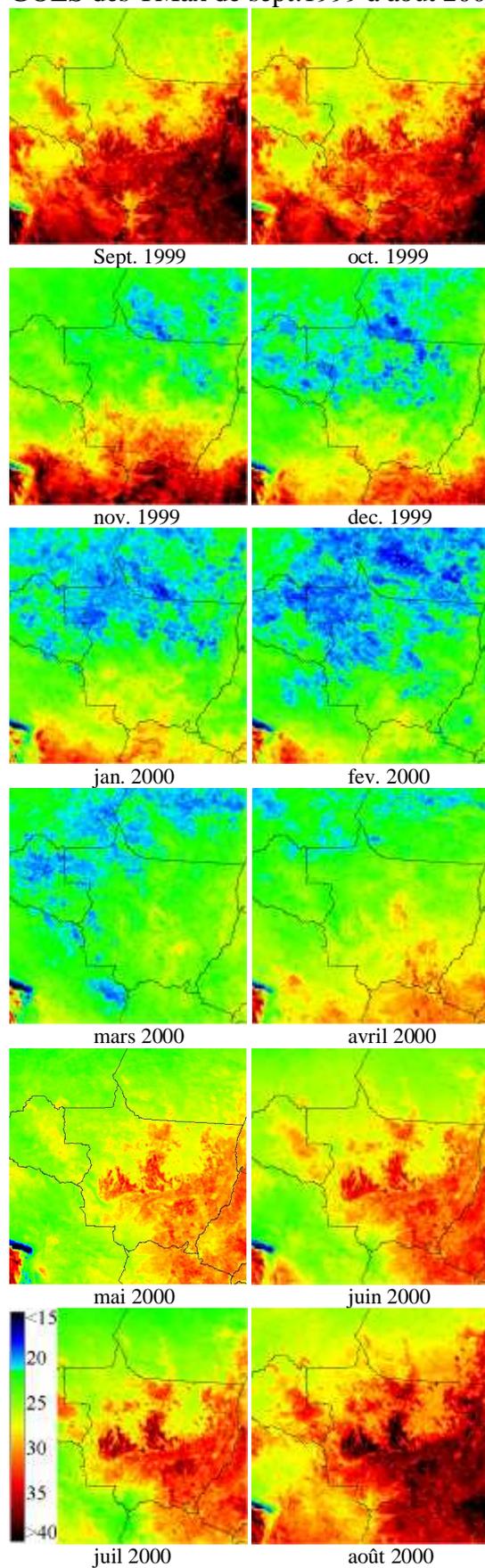


Figure 2.16 : Synthèses mensuelles des Occurrences de sept.1999 à août 2000

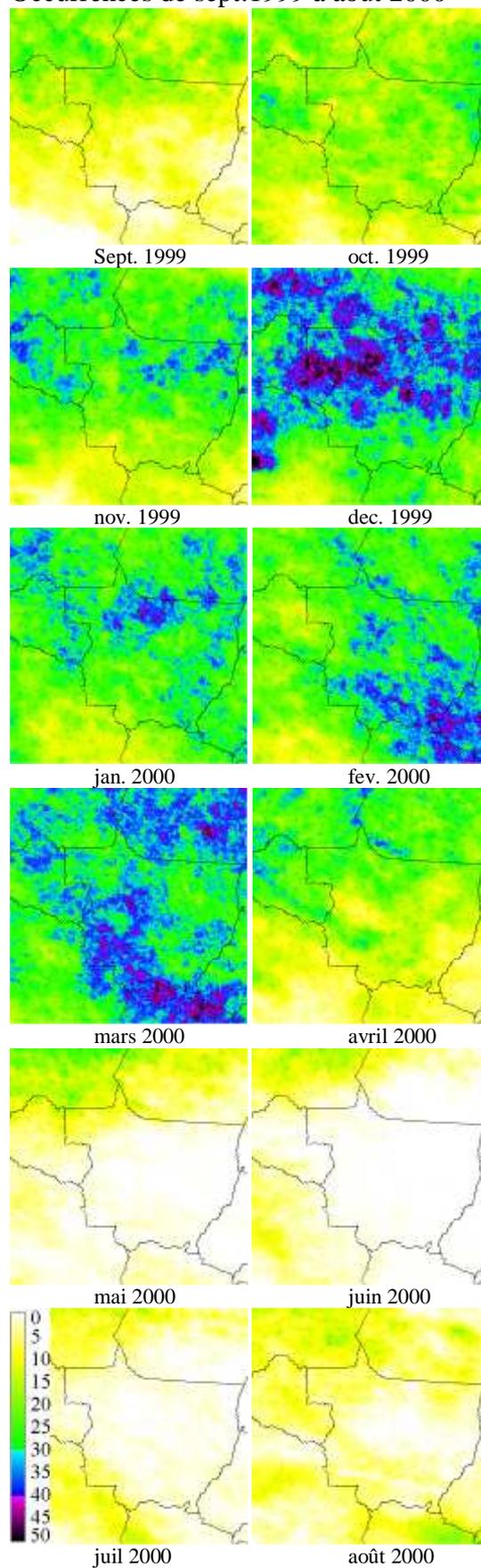


Figure 2.17 : Synthèses mensuelles GOES des TMax de sept.2000 à août 2001

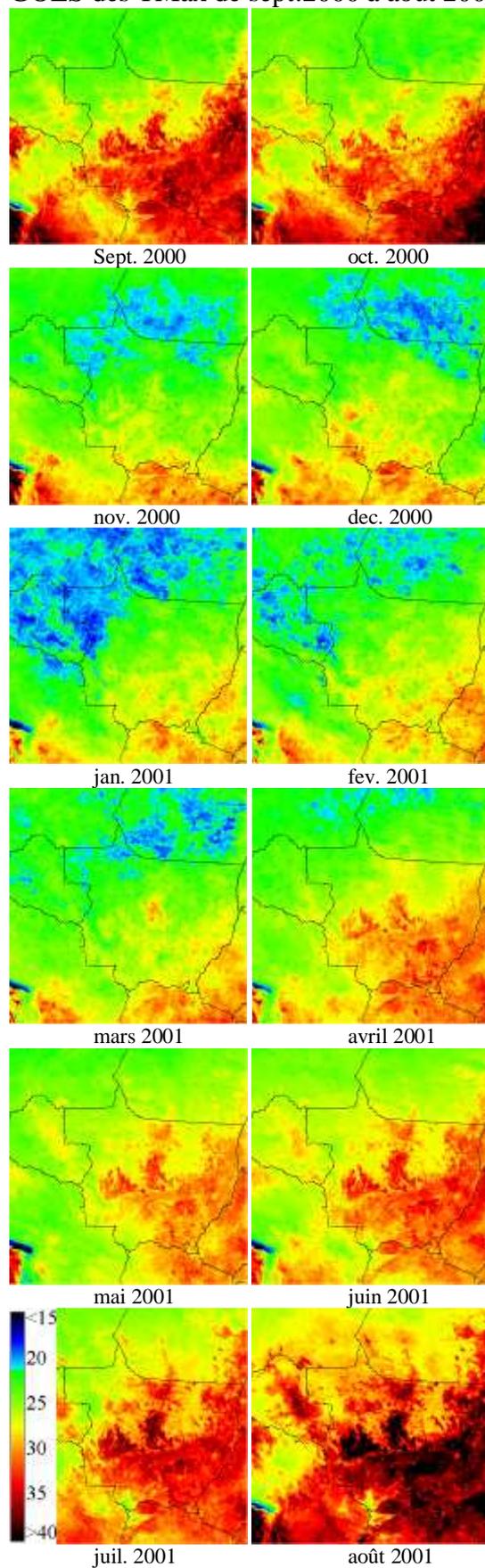
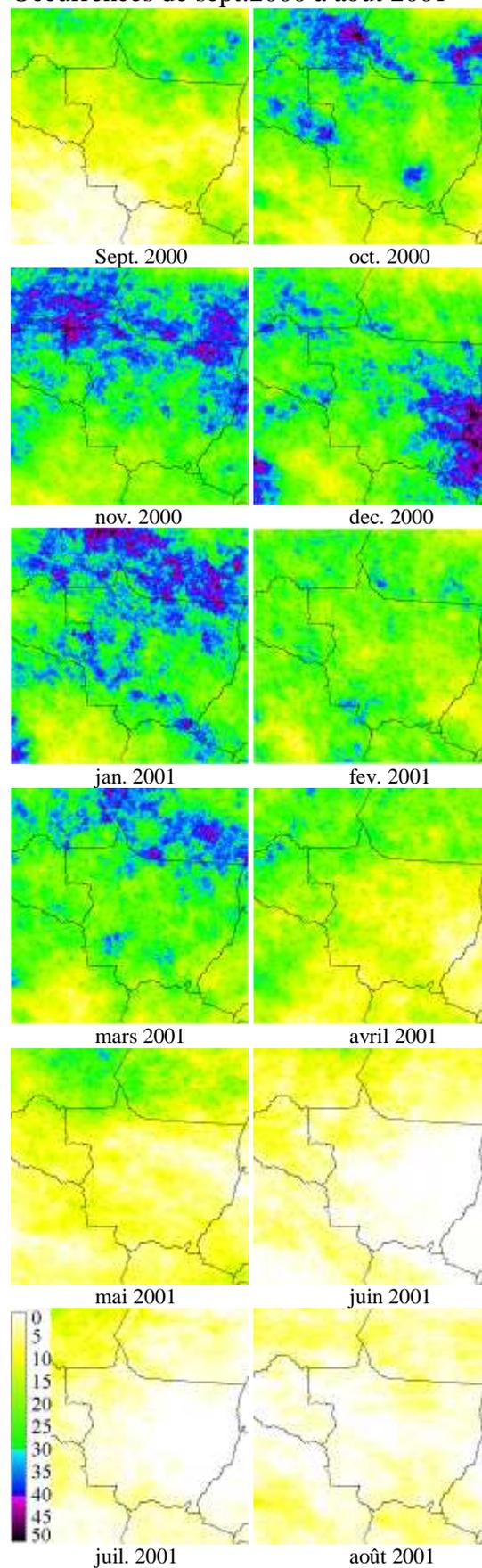


Figure 2.18 : Synthèses mensuelles des Occurrences de sept.2000 à août 2001



Le retrait des systèmes pluvio-gènes est manifeste lors du mois d'avril. 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 et les Tmax s'élèvent rapidement d'avril (25°C) à juillet (35°C). Cette région passe alors sous la domination 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). 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 (elles apparaissent aussi sur la figure 2.7 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).

242. Corrélations entre précipitations, occurrences des nuages à sommet froid et Tmax

Le tableau 2.3 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 décennaux dont les chiffres sont faibles. Pour résoudre cette difficulté on a essayé diverses combinaisons de calculs de corrélations entre pluies décennales et les Tmax (Jallet, 2002) : corrélation avec les Tmax 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 Tmax ; le plus souvent, les précipitations ont un effet rapide sur l'état des couverts et donc des Tmax, 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 Tmax. 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 Tmax. 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
Tmax	-0.513	-0.647	-0.564
Occ+Tmax	---	0.865	0.798

Tableau 2.3 : Coefficients de corrélation (r) entre les pluies mesurées au sol et les données GOES en fonction du pas de temps en 1999-2000 (Occ = occurrences mensuelles des nuages à sommet froid ; Tmax = Température maximale de brillance mensuelle)

Les coefficients de corrélation mensuels (tableau 2.4 et 2.5) 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 (figures 2.19 et 2.20) sont synonymes d'une plus forte pluviométrie; en outre, les corrélations sont statistiquement significatives dans une marge d'erreur de 5% (à l'exception des mois de octobre 1999, mars 2000 et août 2001 pour les Tmax). Mais au-delà de cette cohérence des signes des corrélations, le lien entre précipitations et données satellitaires n'est pas toujours très fort : pour les occurrences, 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) et inversement pour les Tmax. De manière générale, les précipitations sont cependant mieux corrélées aux occurrences de nuages à sommet froid (figure 2.19) qu'avec les températures maximales de surface. Pour ces dernières, l'allure des nuages de points laisse à penser que l'ajustement statistique n'est pas linéaire : la corrélation avec une loi polynomiale d'ordre 2 donne des corrélations meilleures ($r=0,72$ pour 1999-2000 et $r=0,71$ pour 2000-2001) mais la remontée de ce type de courbe pour des valeurs supérieures à 35°C semble peu réaliste.

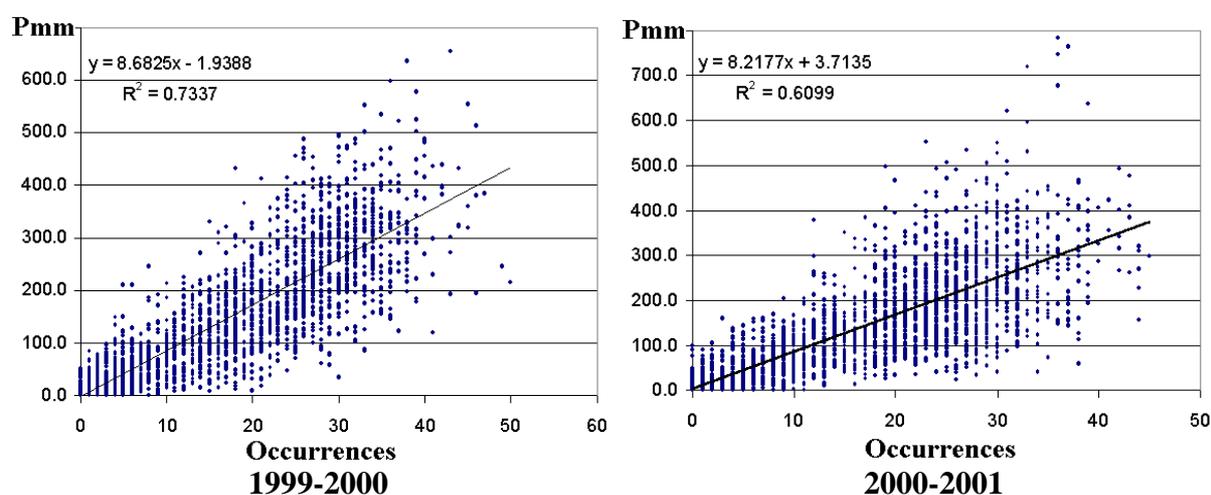


Figure 2.19 : Régressions entre les précipitations mensuelles et les occurrences de nuages à sommet froid GOES

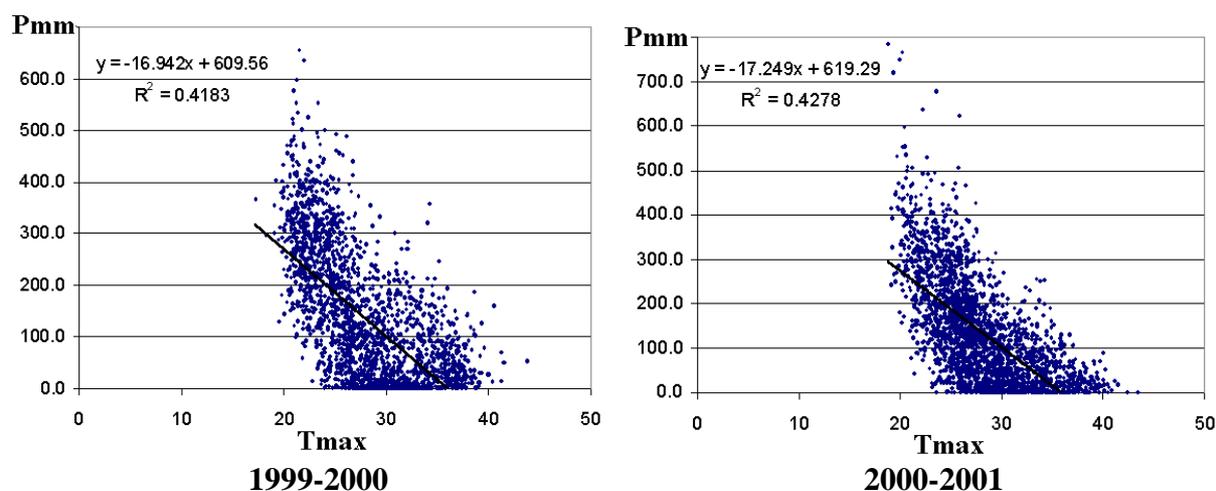


Figure 2.20 : Régressions entre les précipitations mensuelles et les températures maximales GOES

	Nombre d'obs.	Occurrences			Tmax			Occ + Tmax			
		r	a	b	r	a	b	r	A(occ)	B(tmax)	C
1999 Septembre	197	0.60	4.85	27.4	-0.48	-6.00	268.5	0.61	4.06	-1.86	96.0
Octobre	197	0.42	5.32	11.6	-0.13	-2.17	173.9	0.43	5.20	-1.22	52.8
Novembre	188	0.41	5.00	87.8	-0.42	-7.25	395.7	0.44	2.51	-4.44	264.5
Décembre	171	0.58	9.89	-35.4	-0.59	-19.76	755.7	0.64	5.89	-12.36	394.1
2000 Janvier	190	0.67	12.84	-93.3	-0.60	-25.26	854.6	0.71	9.34	-12.35	298.5
Février	170	0.26	3.37	176.5	-0.24	-10.44	514.3	0.45	5.27	-17.29	511.9
Mars	175	0.23	4.24	152.0	-0.15	-8.60	487.2	0.27	4.05	-7.65	336.2
Avril	179	0.64	6.79	19.0	-0.64	-17.70	588.2	0.68	4.00	-9.68	315.6
Mai	184	0.81	7.96	4.7	-0.60	-12.26	370.1	0.81	7.23	-2.29	70.9
Juin	206	0.85	8.07	-0.1	-0.50	-4.53	142.3	0.85	7.83	-0.41	12.3
Juillet	207	0.67	7.33	3.8	-0.65	-6.74	225.1	0.72	4.69	-3.75	123.4
Août	206	0.61	6.04	3.3	-0.35	-3.60	155.0	0.63	5.52	-1.55	58.2
Saison 1999-2000	2270	0.86	8.68	-1.9	-0.65	-16.94	609.6	0.86	7.65	-4.10	129.5
Pmm annuelles	118	0.80	10.93	-453.6	-0.56	-55.15	3559.8	0.80	10.90	-0.34	-436.1

Tableau 2.4 : Coefficients de corrélations (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouges GOES pour la saison 1999-2000; en gras les coefficients supérieurs à 0.60

Obs. = nombre de stations utilisées

Occ = occurrences mensuelles des nuages à sommet froid

Tmax = Température maximale de brillance mensuelle

Occ+Tmax = régression multiple avec occurrences et Tmax

r = corrélation ; a et b = coefficients des droites de régression linéaire

	Nombre d'obs.	Occurrences			Tmax			Occ + Tmax			
		r	a	b	r	a	b	r	A(occ)	B(tmax)	C
2000 Septembre	206	0.61	6.08	14.7	-0.35	-5.84	270.0	0.61	5.63	-1.68	73.0
Octobre	203	0.58	4.96	3.3	-0.44	-6.95	325.7	0.59	4.27	-2.04	80.9
Novembre	207	0.41	5.80	66.1	-0.40	-12.93	546.6	0.45	3.78	-7.88	318.7
Décembre	206	0.41	7.03	43.0	-0.48	-20.94	777.4	0.58	5.45	-17.89	544.5
2001 Janvier	201	0.52	12.68	-103.0	-0.67	-31.62	1032.7	0.69	5.23	-26.38	750.3
Février	200	0.31	6.49	64.3	-0.66	-29.78	944.3	0.67	2.45	-28.22	853.4
Mars	198	0.46	7.37	65.1	-0.49	-23.09	798.6	0.53	4.21	-15.77	521.8
Avril	196	0.69	9.47	-15.0	-0.64	-15.80	550.7	0.71	6.68	-6.62	207.0
Mai	193	0.66	7.40	17.9	-0.39	-8.12	297.9	0.66	7.79	1.10	-14.9
Juin	198	0.66	7.55	4.3	-0.57	-7.90	238.6	0.67	5.95	-2.63	80.7
Juillet	196	0.69	8.29	3.4	-0.48	-4.69	167.5	0.69	8.32	0.04	2.2
Août	197	0.38	4.24	9.6	-0.06	-0.37	33.7	0.38	4.29	0.15	4.1
Saison 2000-2001	2401	0.78	8.22	3.7	-0.62	-17.25	619.3	0.81	6.45	-7.00	228.7
Pmm annuelles	165	0.81	11.87	-659.7	-0.40	-60.01	3729.6	0.82	11.18	-21.02	225.6

Tableau 2.5 : Coefficients de corrélations (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouges GOES pour la saison 2000-2001 ; en gras les coefficients supérieurs à 0.60

Obs. = nombre de stations utilisées

Occ = occurrences mensuelles des nuages à sommet froid

Tmax = Température maximale de brillance mensuelle

Occ+Tmax = régression multiple avec occurrences et Tmax

r = corrélation ; a et b = coefficients des droites de régression linéaire

Enfin, 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 5 mois sur 24 mais restent médiocres ($r < 0.5$) pour 6 mois également. 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.

243. 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 de mettre en évidence les conséquences de certains facteurs géographiques connus et continus (Laborde, 2004) sur la répartition des précipitations et notamment la topographie (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 pluvio-gènes masque un effet orographique qui est statistique) et nous retiendrons donc l'ensemble de la période de septembre 1999 à août 2000 et de septembre 2000 à août 2001.

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. Les figures 2.21A et 2.22A montrent les effets « de trous et bosses » (Laborde, 2004) 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).

Les figures 2.21B et 2.22B (légende et couleurs identiques à la précédente) correspondent à l'estimation des précipitations par satellite en appliquant, pour chaque pixel et pour l'ensemble de l'année, les formules :

$$P \text{ (mm)} = 10.90 \times \text{Occ} - 0.34 \times \text{TBmax} - 436 \text{ pour l'année 1999-2000}$$

$$P \text{ (mm)} = 11.18 \times \text{Occ} - 21.02 \times \text{TBmax} - 226 \text{ pour l'année 2000-2001}$$

Les deux cartes 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. Les figures 2.21B et 2.22B permettent notamment de retrouver les contours de

certain 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 même les suspecter. Vers le sud cependant (Pantanal, Goiás, 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. La question que l'on peut se poser est de savoir si la prise en compte des paramètres géographiques permet d'affiner l'estimation ?

Les corrélations entre les précipitations annuelles et les estimateurs géographiques et satellitaires sont synthétisées dans le tableau 2.6 ci-dessous. Sans surprise, sur cette vaste région, c'est la latitude (codée ici en valeur réelle de -5 à -20° pour la latitude sud) qui est le facteur le plus discriminant, on retrouve ici le gradient sud-nord maintes fois évoqué ; ce facteur a une corrélation juste inférieure à celle obtenue avec les occurrences des nuages à sommet froid GOES. Pour la longitude, le coefficient est faible mais permet de retrouver le gradient secondaire des pluies qui sont plus élevées à l'ouest qu'à l'est.

ANNEE	Nombre d'obs.	Occurrences			Tmax			Occ + Tmax			
		r	a	b	r	A	b	r	A(occ)	B(tmax)	C
1999-2000	118	0.80	10.93	-453.6	-0.56	-55.15	3559.8	0.80	10.90	-0.34	-436.1
		Latitude			Longitude			altitude			
		r	a	b	r	A	b	r	a	b	
Pmm annuelles	118	0.79	87.61	2856.7	-0.16	-17.69	678.5	-0.07	-0.14	1718.2	
		Régression multiple : r = 0.849									

ANNEE	Nombre d'obs.	Occurrences			Tmax			Occ + Tmax			
		r	a	b	r	A	b	r	A(occ)	B(tmax)	C
2000-2001	165	0.81	11.87	-659.7	-0.40	-60.01	3729.6	0.82	11.18	-21.02	225.6
		Latitude			Longitude			altitude			
		r	a	b	r	a	b	r	a	b	
Pmm annuelles	165	0.75	101.48	3017.6	-0.35	-54.86	-1472	-0.01	-0.03	1589.2	
		Régression multiple : r = 0.868									

Tableau 2.6 : Corrélations et régressions entre les précipitations annuelles et les paramètres géographiques (latitude, longitude, altitude) et satellitaires (occurrences et Tmax).

Le paramètre altitude n'apparaît pas pertinent pour expliquer à cette échelle les précipitations (corrélation proche de 0) ce qui semble contradictoire avec les conclusions précédentes. En fait, la répartition des reliefs et des stations fausse l'analyse. En effet, le relief (dépassant rarement 1000 mètres) ne vient que moduler la répartition des précipitations qui obéit d'abord à une logique zonale et synoptique. Les écarts entre les moyennes des précipitations, à une même altitude, au nord (plus de 2500mm) et au sud (moins de 800mm) occultent à l'échelle de l'ensemble de la région étudiée les nuances que peut apporter la topographie. Pour illustrer ceci prenons une sélection de stations proches mais situées à des altitudes différentes ; seul le sud du Mato Grosso peut ainsi être étudié, la densité du réseau de station étant insuffisante dans le nord de l'Etat. La région de la Chapada dos Guimarães et de la Chapada dos Parecis

possèdent toutes les deux des groupes de quatre stations distantes les unes des autres de moins de 50 kilomètres (tout de même !) et situées à des altitudes différentes.

Station	Code	Altitude (m)	Précipitations (moy.1982-2002)
PARECIS (BR-364)	119	476	1910
TAPIRAPUA	120	212	1701
TANGARA DA SERRA	121	448	1910
DECIOLANDIA	122	617	2050
CHAPADA DOS GUIMARAES	135	725	2133
PONTE ALTA	134	610	1879
USINA CASCA III PR2	137	436	1672
CUIABA (PCD)	141	151	1364

Tableau 2.7 : Altitude et précipitations moyennes annuelles pour les stations de la Chapada dos Parecis et de la Chapada dos Guimarães

Dans ce cas la relation entre altitude et pluviométrie est plus évidente dans chacune des deux régions. Etant situées à une latitude comparable (15°S environ) les stations prises dans leur ensemble permettent de dégager un lien très significatif ($r=0,895$) entre les deux paramètres.

La droite d'ajustement linéaire ($P_{mm} = 1,1 \text{ Alt} + 1324$) **montre que le gradient pluviométrique est de l'ordre de 110 millimètres pour 100 mètres d'altitude.** On voit donc avec cet exemple que **les critères d'interprétation de la répartition des précipitations changent en fonction de l'échelle spatiale : l'effet de latitude prime nettement pour l'ensemble du Mato Grosso alors qu'à l'échelle supérieure (régionale) l'effet topographique s'exprime plus nettement.** Dans tous les cas, ce sont cependant les données satellitaires qui constituent le meilleur paramètre pour affiner la spatialisation des précipitations aux différentes échelles.

A partir des résultats du tableau 2.6 il est donc possible de construire une carte détaillée de la pluviométrie matogrossense pour les deux années 1999-2000 et 2000-2001. La régression multiple combinant les informations satellitaires (occurrences et Tmax) ainsi que les paramètres géographiques (altitude, latitude, longitude) présente des coefficients satisfaisants, respectivement 0,85 et 0,87. Ces corrélations sont un peu moins bonnes que celles que nous avons pu obtenir avec une méthode similaire pour interpoler les températures de l'air en Bretagne (Dubreuil et al., 2002) mais la variabilité spatio-temporelle des précipitations (particulièrement en milieu tropical) est bien supérieure à celle des températures. L'estimation des précipitations pour les deux années peut donc être réalisée avec les formules suivantes :

$$P_{mm} = 1440,6 + 0,54.\text{altitude} + 50,06.\text{latitude} + 4,18.\text{longitude} + 6,14.\text{occ} - 6,14.T_{max}$$

pour l'année 1999-2000 et

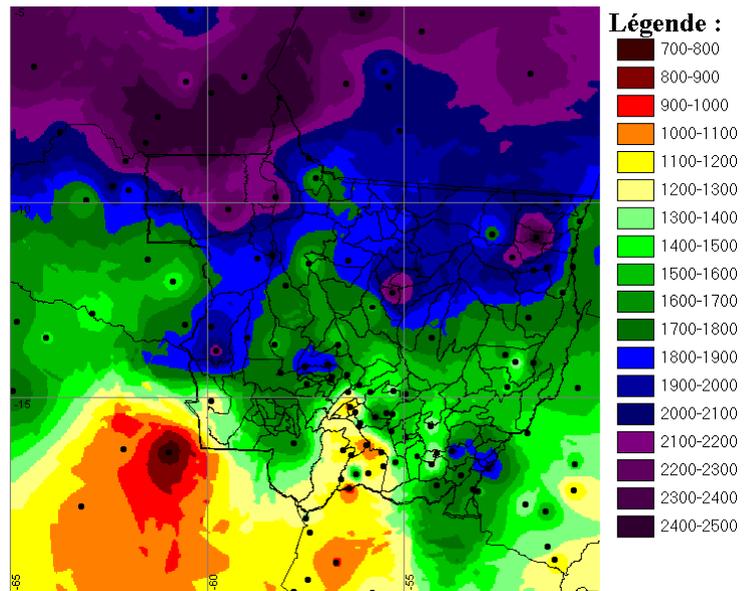
$$P_{mm} = 485,6 + 0,69.\text{altitude} + 46,24.\text{latitude} - 15,8.\text{longitude} + 7,29.\text{occ} - 19,96.T_{max}$$

pour l'année 2000-2001

Les cartes des figures 2.21 et 2.22 synthétisent la construction progressive d'une cartographie détaillée des précipitations annuelles : interpolation des précipitations à partir des seuls postes pluviométriques au sol (A), estimation à partir des données satellitaires (B) et finalement (C) estimation reposant sur l'ensemble des données disponibles (mesures au sol, satellite, paramètres géographiques).

Figure 2.21 : cartographie des précipitations de l'année 1999-2000 au Mato Grosso

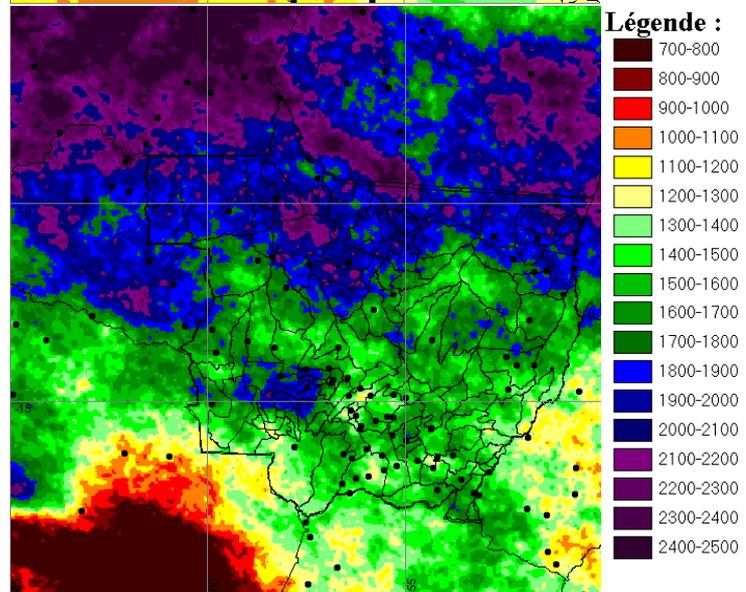
A- interpolation spatiale ($1/d^2$) à partir des seules mesures des postes pluviométriques au sol



B- Estimation à partir des données GOES (occurrences et Tmax) et régression linéaire avec les mesures au sol

$$P(\text{mm}) = 10,90 \times \text{Occ} - 0,34 \times \text{TBmax} - 436$$

$$r = 0,80$$



C- Interpolation globale à partir d'une régression multiple utilisant les données satellitaires (occurrences et Tmax) et les paramètres géographiques (altitude, latitude, longitude)

$$P_{\text{mm}} = 1440,6 + 0,54 \cdot \text{altitude} + 50,06 \cdot \text{latitude} + 4,18 \cdot \text{longitude} + 6,14 \cdot \text{occ} - 6,14 \cdot \text{Tmax}$$

$$r = 0,85$$

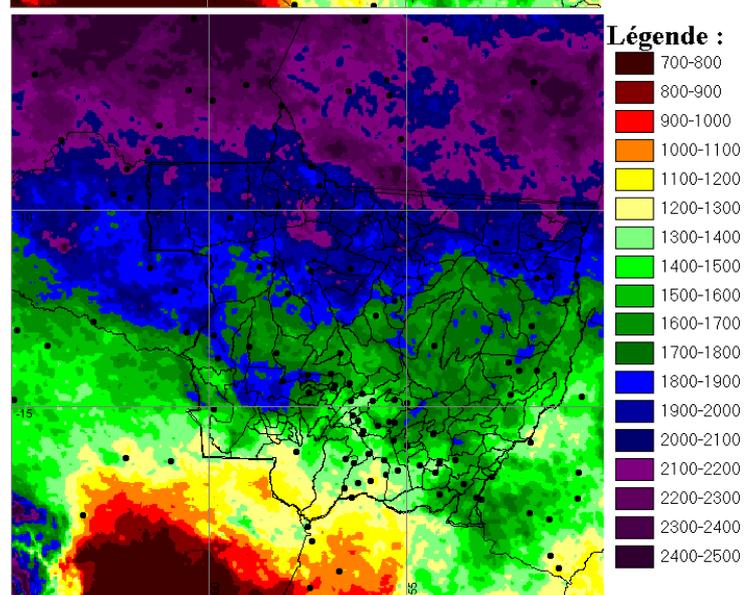


Figure 2.22 : cartographie des précipitations de l'année 2000-2001 au Mato Grosso

A- interpolation spatiale ($1/d^2$) à partir des seules mesures des postes pluviométriques au sol

B- Estimation à partir des données GOES (occurrences et Tmax) et régression linéaire avec les mesures au sol

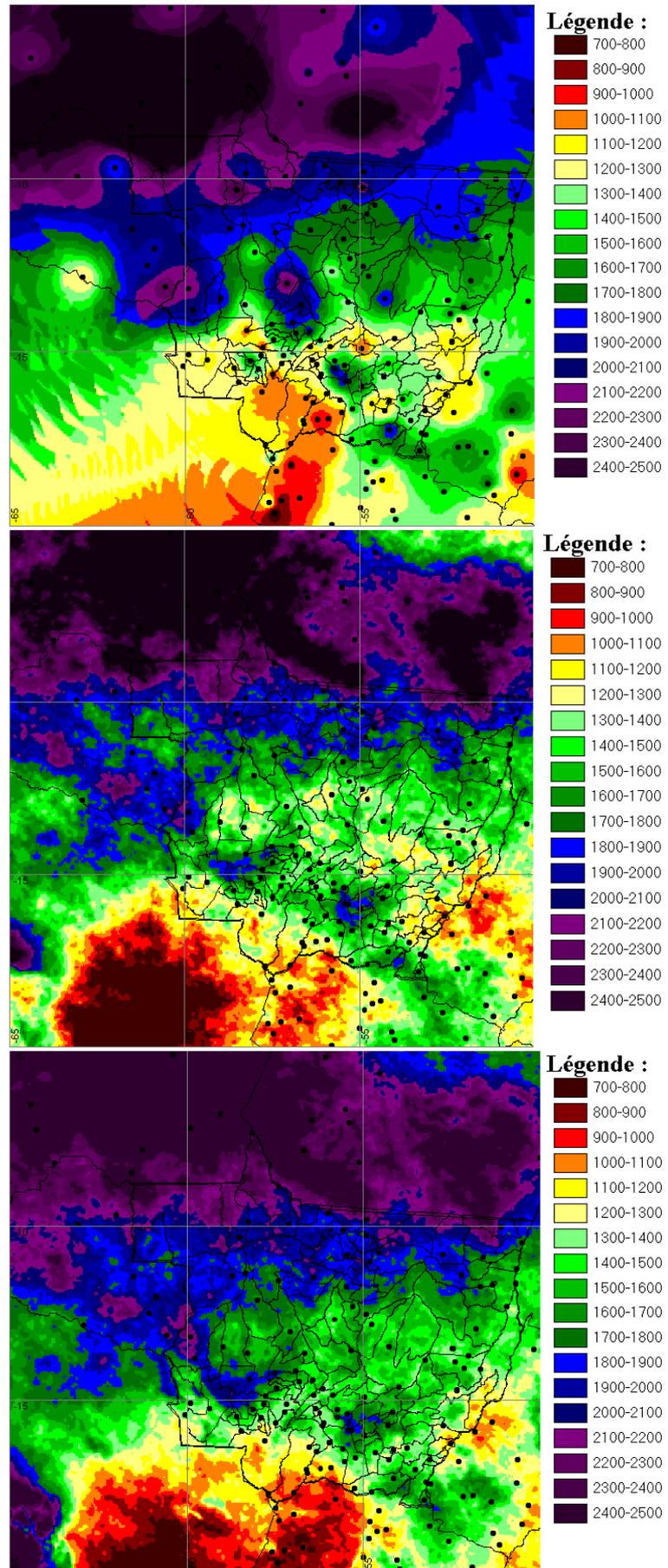
$$P(\text{mm}) = 11.18 \times \text{Occ} - 21.02 \times \text{TBmax} - 226$$

$$r = 0,81$$

C- Interpolation globale à partir d'une régression multiple utilisant les données satellitaires (occurrences et Tmax) et les paramètres géographiques (altitude, latitude, longitude)

$$P_{\text{mm}} = 485,6 + 0,69 \cdot \text{altitude} + 46,24 \cdot \text{latitude} - 15,8 \cdot \text{longitude} + 7,29 \cdot \text{occ} - 19,96 \cdot \text{Tmax}$$

$$r = 0,87$$



Les cartes C des figures 2.21 et 2.22 permettent d'apprécier visuellement l'organisation spatiale des précipitations au Mato Grosso pour les deux années étudiées. Le gradient en latitude, les effets de la topographie apparaissent clairement et l'imagerie satellitaire permet d'apporter une information continue et cohérente sur l'ensemble de l'espace à une résolution incomparablement supérieure à celle offerte par le réseau d'observation au sol. L'étude des résidus va servir à préciser l'analyse.

Ecart absolu	en %		Ecart relatif	en %	
	1999-2000	2000-2001		1999-2000	2000-2001
Ecart supérieur à 500mm	2.5	3.6	Ecart supérieur à 50%	0.0	0.6
Ecart entre 400 et 500mm	3.4	4.9	Ecart entre 40 et 50%	0.0	1.2
Ecart entre 300 et 400mm	11.9	10.3	Ecart entre 30 et 40%	2.5	3.7
Ecart entre 200 et 300mm	16.9	18.2	Ecart entre 20 et 30%	13.6	13.9
Ecart entre 100 et 200mm	32.2	28.5	Ecart entre 10 et 20%	29.7	31.5
Ecart inférieur à 100mm	33.1	34.5	Ecart inférieur à 10%	54.2	49.1

Tableau 2.8 : Synthèse des résidus (absolus et relatifs) des estimations des précipitations annuelles au Mato Grosso en 1999-2000 et 2000-2001

Le tableau 2.8 de synthèse des résidus montre que l'erreur d'estimation par le modèle est inférieure à 200mm dans les deux tiers des cas pour les deux années étudiées, un tiers des valeurs étant même estimées à 100mm près. Dans un cas sur 5, cependant, l'estimation n'est pas bonne (plus de 300mm entre le modèle et la réalité). En valeur relative, les mêmes constatations peuvent être faites : la moitié des estimations s'écartent de la réalité de moins de 10% et 4 sur 5 de moins de 20%. Seules 2,5% des estimations s'écartent de plus de 30% de la valeur observée en 1999-2000 contre 5,5% en 2000-2001. Si on croise pour chaque station les écarts au modèle en valeurs absolues supérieures à 200mm et celles en valeurs relatives supérieures à 20%, ce sont 16% des estimations qui peuvent être considérées comme non satisfaisantes en 1999-2000 et 19% en 2000-2001.

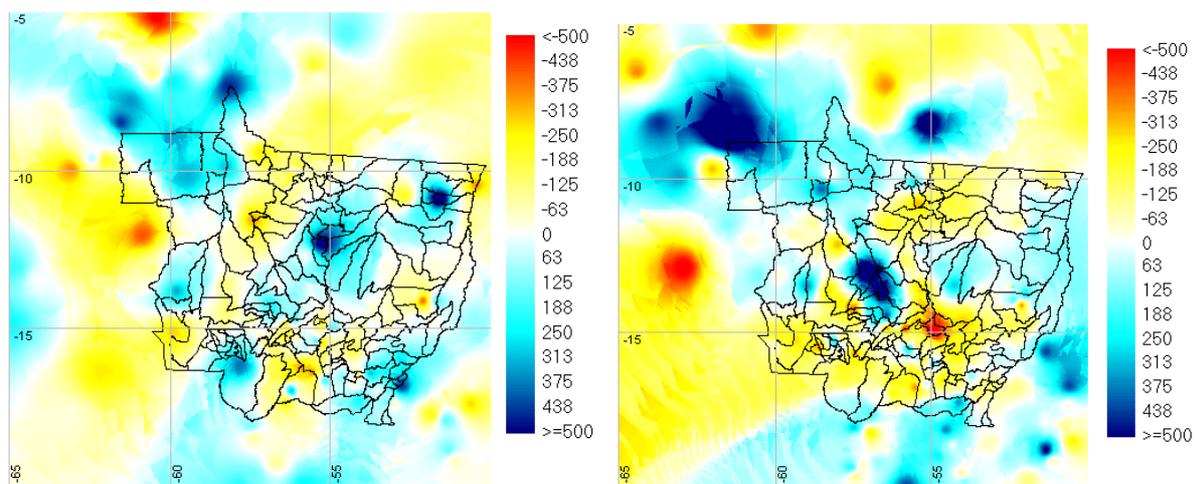


Figure 2.23 : Cartographie des résidus (en mm) de l'estimation des précipitations annuelles au Mato Grosso en 1999-2000 (à gauche) et 2000-2001 (à droite)

Les cartes de la figure 2.23 permettent d'observer la répartition spatiale des résidus. Aucune structure géographique n'apparaît clairement et, surtout, très peu de points communs entre les deux cartes peuvent être soulignés : il n'existe pas de régions (au sens d'un regroupement de plusieurs stations voisines) où le modèle tendrait à sous-estimer ou sur-estimer les précipitations à l'exception de l'extrême nord-ouest du Mato Grosso et du sud-est de l'Etat d'Amazonas. C'est d'ailleurs ici que se trouve la station la plus éloignée du modèle en 2000-2001 : Bodoco avec 2527mm estimés contre 3465 observés dont 677mm pour le seul mois de mars 2001 ! Il semble donc que la variabilité spatio-temporelle des précipitations représente l'essentiel des résidus par rapport au modèle présenté ici.

Synthèse des résultats sur l'estimation des précipitations :

Au Mato Grosso, sur la période de septembre 1999 à août 2001, 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, en tenant compte de l'ensemble des observations pluviométriques et de toutes les données satellitaires mensuelles, on obtient une corrélation de 0,86 en 1999-2000 et 0,78 en 2000-2001 avec les occurrences de nuages à sommet froid et de -0,65 en 1999-2000 et -0,62 en 2000-2001 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 ($r=0.86$ en 1999-2000 et $0,81$ en 2000-2001).

Les résultats apparaissent cependant un peu moins bons 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 30minutes 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 mensuel 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 de Tmax reflètent donc davantage la nature des paysages et de la végétation que la manière dont réagit le couvert à la pluviométrie**. Il faut 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.

2.5. Apport des synthèses NDVI SPOT-Végétation pour le suivi des interactions climat-agriculture

De nombreux travaux sont engagés dans le cadre de programmes portant sur le changement global, afin d'étudier les variations climatiques et les facteurs qui les génèrent (IGBP, *International Geosphere-Biosphere Programme*). Une bonne partie d'entre eux portent sur la détection de changements brutaux et spectaculaires, telles que la déforestation ou les inondations (Lambin et Strahler, 1994). Ils sont menés à l'échelle globale, continentale ou sub-continentale à partir d'images satellites d'observation de la terre à haute répétitivité, avec une fréquence d'acquisition d'images quotidienne, et à basse résolution spatiale, de l'ordre du kilomètre. Cependant, à ces échelles les chercheurs sont fréquemment confrontés au problème de la validation des changements détectés, le saut à effectuer pour confronter les résultats aux observations effectuées à l'échelle locale sur le terrain étant trop important (Lupo et al., 2001). En outre, à partir des seules images de satellites, il n'est pas toujours évident de faire la part des changements d'occupation du sol de ce qui relève de la variabilité interannuelle du climat. A tout moment, le géographe doit valider l'observation satellitaire avec les données qu'il acquiert sur le terrain et déterminer quels sont les facteurs explicatifs des informations fournies par le satellite.

Dans le cas du Mato Grosso, les variations du signal satellitaire observé peuvent résulter (indépendamment des conditions de prise de vue ; Bariou et al., 1985) de changements profonds de l'utilisation du sol comme la déforestation ou l'extension urbaine mais aussi résulter de la quantité de précipitations reçues par le couvert végétal (Kogan, 1990). Le suivi de ce dernier est généralement réalisé à partir de synthèses décennales et mensuelles de NDVI (Maximum Value Composite, voir 1^e partie). Dans la continuité des travaux menés en Bretagne sur l'impact de la sécheresse sur le couvert végétal, nous avons entrepris de mener ce type d'approche au Mato Grosso en utilisant les produits SPOT-Végétation de meilleure qualité que les images NOAA-AVHRR utilisées au cours de ma thèse. Présentons d'abord les profils saisonniers des différents types de couverts présents au Mato Grosso avant de les mettre en relation avec la pluviométrie et éventuellement les rendements agricoles.

251. Profils saisonniers et pluviométrie

La figure 2.24 est la synthèse des moyennes mensuelles des NDVI maxima observés par SPOT-Végétation de 1998 à 2004 pour l'ensemble du Mato Grosso. L'opposition entre le nord de l'Etat (forestier) et le sud (cultures et cerrados) est bien marquée pendant la saison sèche (Gurgel & Ferreira, 2003). Les contrastes sont moins marqués pendant la saison pluvieuse, d'une part parce que les indices sont plus faibles sur la forêt et, d'autre part, en raison des valeurs plus élevées du NDVI sur les régions de culture. Pour préciser le comportement saisonnier des différents types de couverts, nous avons sélectionné 6 secteurs représentatifs dont les profils 1998-2004 ainsi que les moyennes sont présentés sur la figure 2.25.

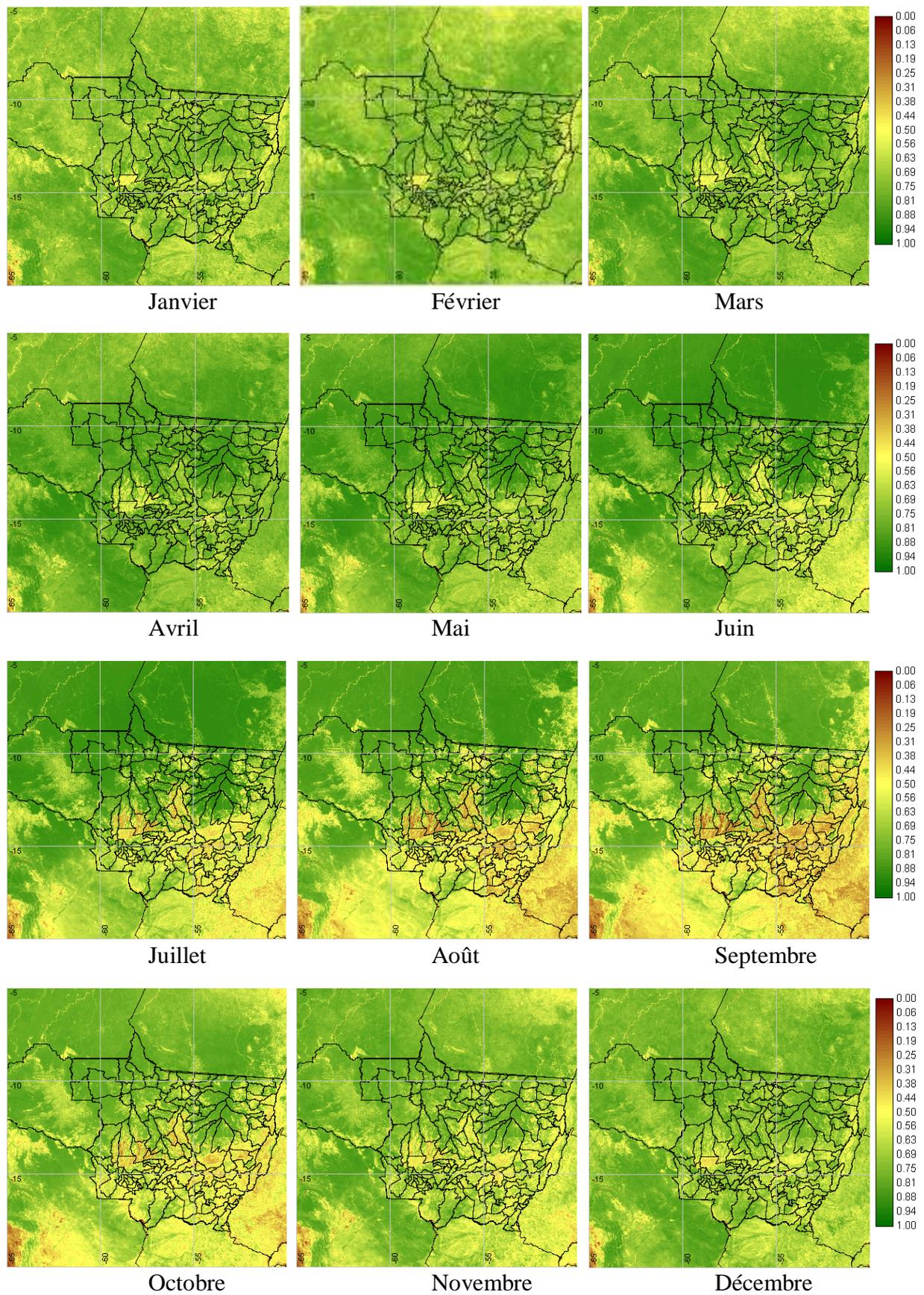


Figure 2.24 : Synthèses mensuelles des NDVI SPOT-VGT (moyennes 1998-2004)

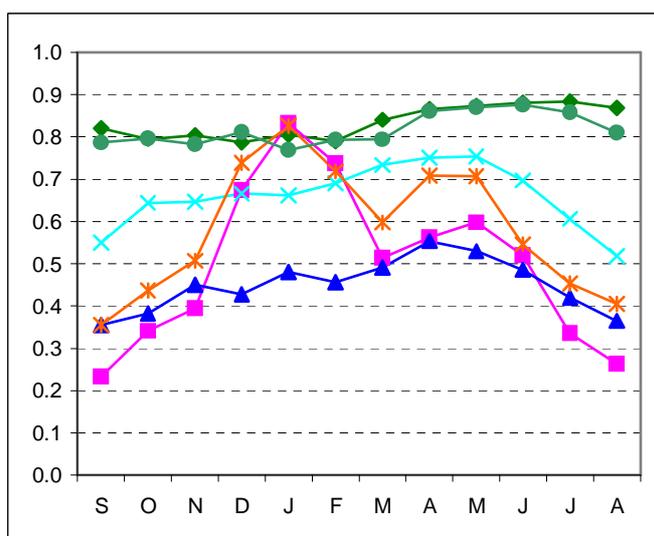
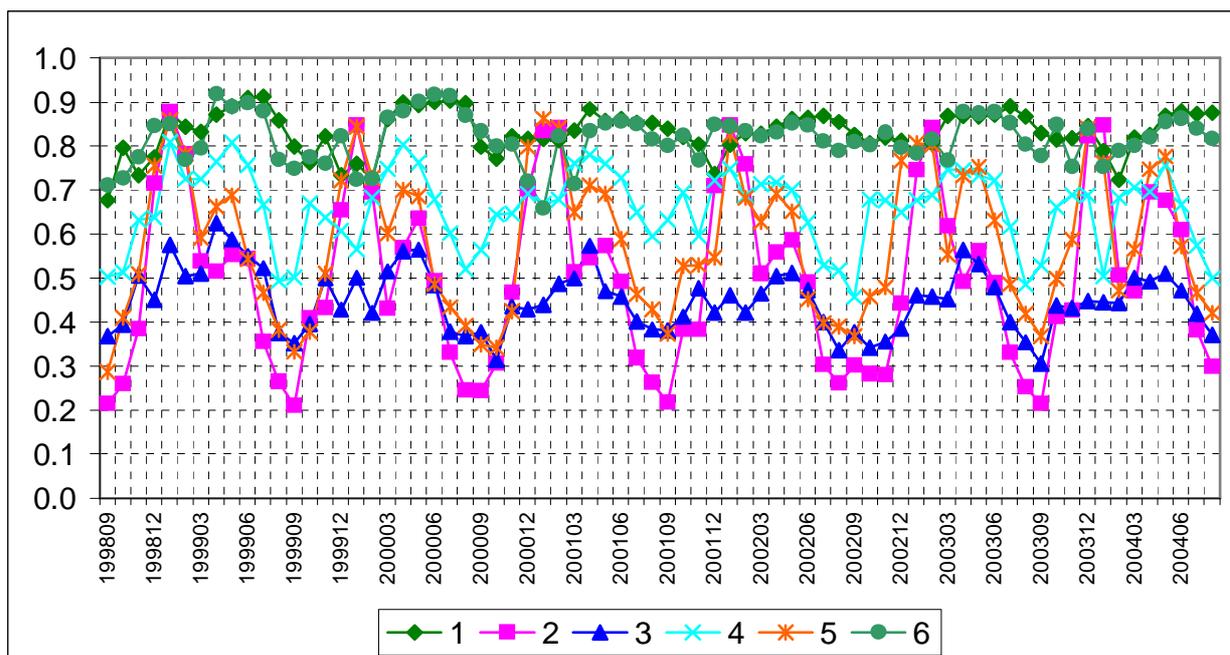


Figure n°2.25 : Profils temporels des NDVI mensuels SPOT-VGT pour différents types de couverts :

ci-dessus : suivi pluriannuel de septembre 1998 à août 2004

ci-contre (même légende) : moyennes mensuelles 1998-2004

Légende :

- 1 : Forêt, parc du Xingu (Feliz Natal)
- 2 : Cultures, Campo Novo do Parecis
- 3 : Cerrado, Chapada dos Parecis
- 4 : Pâturages, Alta Floresta
- 5 : Cultures, Sorriso
- 6 : Forêt, réserve de Brasnorte

Les couverts forestiers présentent de faibles variations moyennes et interannuelles de leur indice de végétation qui, sans surprise, reste constamment élevé pour les deux échantillons choisis. On peut remarquer, cependant, que les valeurs les plus élevées sont observées en juin, c'est à dire au début de la saison sèche alors que les valeurs les plus faibles se situent de décembre à février au cœur de la saison des pluies. Outre le problème des nuages (Asner, 2001) qui, pendant la saison arrosée, affecte, en les diminuant, les valeurs du NDVI, il faut interpréter ces profils comme le temps nécessaire à la forêt ombrophile pour réagir au régime pluviométrique annuel : plusieurs auteurs (Machado et al., 2004 ; Huete et al., 2005) ont observé ce décalage qui peut même parfois être exactement opposé au cycle des précipitations. Bien que moins prononcé, ce décalage existe aussi pour les cerrados de la Chapada dos Parecis, le maximum (bien inférieur à celui des forêts) étant observé en avril, à l'extrême fin de la

saison des pluies ; dans le cas des cerrados, le minimum d'août-septembre correspond bien, en revanche, à la fin de la saison sèche.

Les profils NDVI des pâturages d'Alta Floresta sont assez parallèles à ceux du cerrado et appellent les mêmes remarques à savoir un cycle proche de celui des précipitations mais décalé d'environ deux mois par rapport aux extrêmes pluviométriques. Notons cependant que les valeurs des couverts de graminées sont plus élevées que celles des savanes : en effet, les hautes herbes des pâturages artificiels peuvent être particulièrement couvrantes et denses.



Photo 2.5 : Pâturage artificiel en Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) à Alta Floresta (NDVi², juin 2003)

Les courbes des deux secteurs de cultures choisis se distinguent particulièrement bien des autres profils. Ils sont d'abord marqués par de forts contrastes, nettement plus importants que ceux enregistrés par les cerrados et les pâturages et bien sur les forêts : l'opposition entre la saison sèche où les sols sont à nu (les couvertures de millet, complètement sec en juillet-août, ne suffisent pas à faire remonter le NDVI) et la saison des pluies avec les cultures en plein développement est très bien marquée. On remarque également que les courbes des secteurs de cultures de Sorriso et Campo Novo do Parecis présentent deux maxima que l'on doit mettre cette fois en relation avec les pratiques agricoles : le premier maximum centré sur janvier correspond à la culture principale (*safrá*), généralement de soja et récolté en février. Le second maximum centré sur avril-mai correspond à la culture secondaire (*safrinha*), généralement constituée de maïs semé juste après la récolte principale et récolté en juin. Le minimum secondaire observé en mars est donc (comme en août septembre) une période où une bonne partie des sols sont également à nu entre les deux cultures. Le lien avec la pluviométrie peut être mis en évidence à partir des valeurs observées à Sinop (figure 2.26).

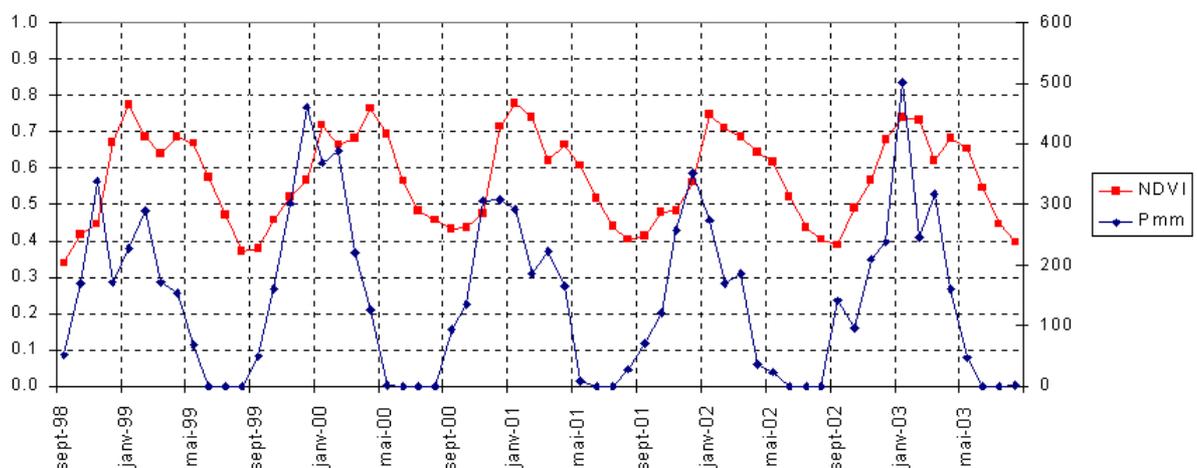


Figure 2.26 : Evolution mensuelle du NDVI et des précipitations à Sinop (fazenda Sempre Verde) de 1998 à 2003 (d'après Arvor, 2005).

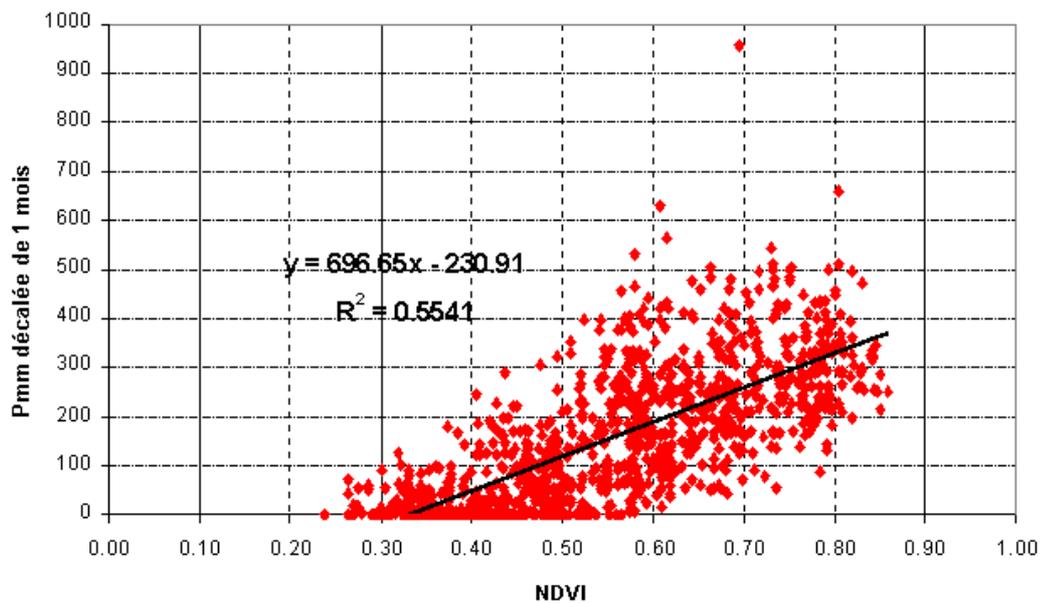


Figure 2.27 : Corrélation entre les NDVI et les précipitations mensuelles du mois précédent pour les secteurs en culture des municípios du centre du Mato Grosso de 1999 à 2003 (d'après Arvor, 2005)

Les graphiques et les corrélations (figure 2.27) montrent que le décalage entre les précipitations et les valeurs de NDVI est plus faible que pour les forêts et les pâturages puisqu'il n'est plus que d'un mois environ. On remarque que la variabilité des précipitations observées pendant la saison humide ne coïncide pas avec des fluctuations équivalentes du NDVI, même si, de manière générale la corrélation est assez bonne entre les valeurs du NDVI et les précipitations du mois précédent ($r=0,74$). Le cycle des cultures est bien calé sur le début de la saison des pluies (forte augmentation du NDVI d'octobre à décembre) alors que la diminution du NDVI (plus lente voire avec un maximum secondaire en avril-mai) apparaît plus décalée par rapport aux précipitations et résulte de choix culturaux.

Ces résultats montrent que si, de façon globale le cycle de végétation annuel est calqué sur celui des précipitations (quoique décalé dans le temps de un à quatre mois), dans le détail de grandes disparités existent quant à l'intensité du lien entre les deux paramètres. Les contrastes sont dans l'ensemble plus marqués pendant la saison sèche (notamment entre les forêts et les zones cultivées) alors que les valeurs de NDVI sont plus proches pendant la saison humide (Machado et al., 2004). Dans le cas des cultures, le cycle observé est certes calé sur les précipitations mais son explication dans le détail relève davantage des pratiques culturelles et des calendriers agricoles.

252. NDVI et rendements agricoles

Les précipitations contribuant à expliquer partiellement à la fois les variations temporelles du NDVI et des rendements agricoles, il est tentant d'essayer de mettre en relation directement le signal satellitaire avec les rendements des cultures. Les résultats présentés ici doivent être considérés comme préliminaires, ces travaux n'ayant pu débiter que récemment une fois constituées les bases de données satellitaires, pluviométriques et agricoles. Ce type d'approche (Wiegand et al., 1991) a largement été réalisée en Europe (programme MARS : *Monitoring Agriculture by Remote Sensing*), aux Etats-Unis (programme LACIE : *Large Area Crop Inventory Experiment*), en Inde (Mall et al., 2004), en Afrique (Prince, 1991 ; Diallo et al., 1991) ainsi que dans le sud du Brésil mais n'a pas encore été testé dans le cadre de cette nouvelle frontière agricole où, pourtant, les enjeux économiques et écologiques sont importants. Les résultats antérieurs sur les rendements de maïs et soja du début de cette deuxième partie nous incitent à séparer l'étude des rendements de ces deux productions. Dans les deux cas, les statistiques des municípios de Campo Novo do Parecis, Lucas de Rio Verde et Nova Mutum seront analysés. Ce choix est justifié par la présence de données pluviométriques relativement fiables, et par l'importance des cultures dans ces municípios. A chaque fois les indices NDVI n'ont été calculés que sur les surfaces en culture déterminées suite à une classification des profils temporels SPOT-VGT. Les années considérées ici sont les années « climatiques » ou « agronomiques utiles » de septembre à août : les données s'étendent donc de 1999 (récoltes de janvier à juin mais cycle débutant en septembre 1998) à 2003 (dernières statistiques agricoles disponibles utilisées ici). Précisons que les corrélations, calculées sur uniquement 5 valeurs ne donneront qu'une simple indication du lien potentiel entre les variables, l'échantillon étant, pour le moment, très limité.

SOJA	Campo Novo P.	Lucas do RV	Nova Mutum
NDVI déc	-0.253	-0.064	0.022
NDVI janv	-0.390	-0.267	-0.390
NDVI févr	0.170	-0.357	-0.075
NDVI max	-0.314	-0.265	-0.399
NDVI cumul-sept/fevr	0.000	0.347	0.208
NDVI cumul-sept/janv	-0.056	0.554	0.419
NDVI cumul oct/fevr	-0.051	0.284	0.055
NDVI cumul oct/janv	-0.149	0.477	0.161
NDVI cumul janv+fevr	-0.168	-0.268	-0.251

Tableau 2.8 : Corrélations entre les rendements de soja 1999-2003 et différents indicateurs NDVI de SPOT-VGT (en gras, $r > 0,4$)

Dans le cas du soja, le tableau 2.8 montre l'absence de lien significatif entre les rendements de cette culture et les différents indicateurs de NDVI (mensuel, maximum, cumulé sur différentes périodes). Les quatre premiers indicateurs (décembre, janvier, février et maximum) sont même plutôt liés négativement aux rendements ! On peut éventuellement voir ici la traduction du fait qu'une trop forte pluviométrie en fin de cycle végétatif peut favoriser la croissance de la plante et donc du NDVI mais les mauvaises conditions dans lesquelles s'effectuent alors les récoltes (voir plus haut)

obèrent finalement sa qualité et donc les rendements finaux. Le lien le plus intéressant (quoique très modeste) est obtenu avec le NDVI cumulé sur l'ensemble du cycle culturel de septembre à janvier, encore que dans le cas de Campo Novo do Parecis ce lien soit inexistant. Les graphiques de la figure 2.28 permettent de préciser dans le détail la nature de cette relation pour chacun des trois municípios : l'absence de lien très marqué se confirme sur ces graphiques mais permet aussi d'observer qu'à chaque fois la valeur des rendements la plus faible (point situé dans la partie inférieure du graphique) est celle de l'année 1999. L'interprétation de ces valeurs fortement « résiduelles » en 1999 peut être liée à la qualité des données statistiques (nombreuses divergences de rendements constatées sur le terrain entre les données de l'IBGE et de l'EMPAER par exemple), satellitaires (premier cycle de SPOT-VGT de qualité inférieure). Plus vraisemblablement il paraît difficile, avec les données actuellement disponibles, d'espérer trouver un lien direct et fort entre ces deux séries.

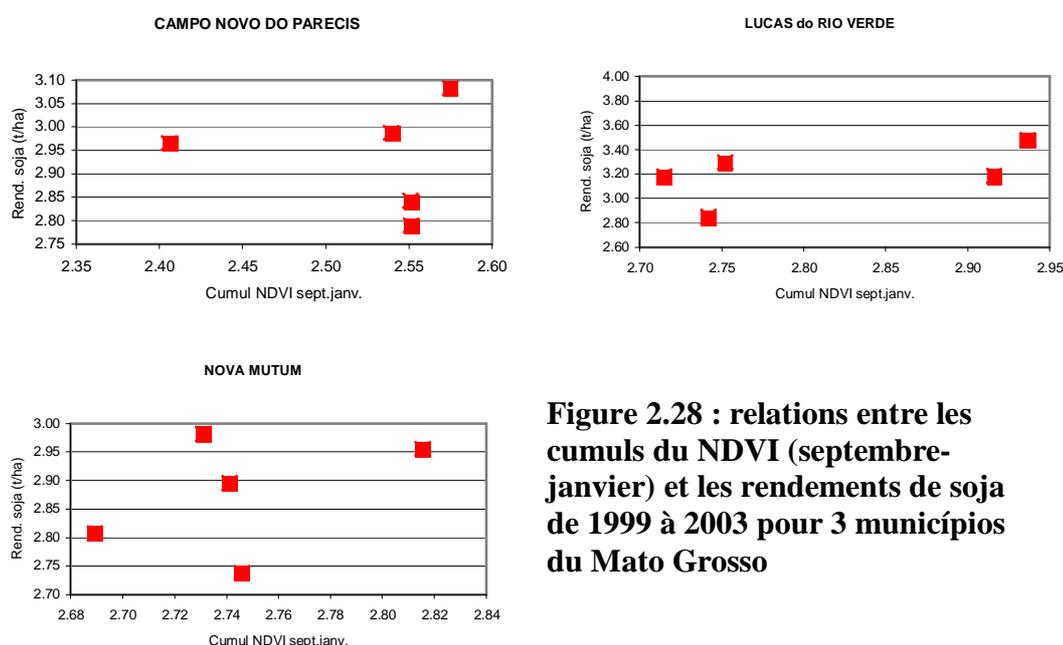


Figure 2.28 : relations entre les cumuls du NDVI (septembre-janvier) et les rendements de soja de 1999 à 2003 pour 3 municípios du Mato Grosso

Si on observe maintenant les résultats concernant le maïs (tableau 2.9) on constate des corrélations globalement bien plus significatives avec près de la moitié des corrélations égales ou supérieures à 0,4 (contre seulement 3 dans le cas du soja). Rappelons que le maïs est généralement pratiqué en deuxième culture (récolté en juin) et que ce sont donc les valeurs de NDVI de mars à juin qu'il faut étudier à présent.



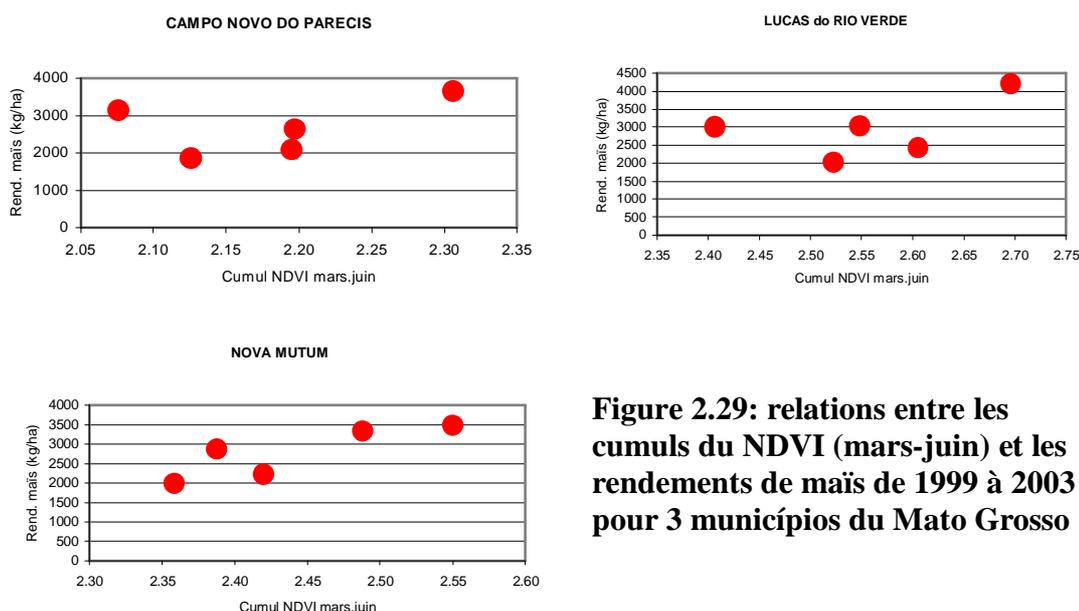
Photo 2.6 : Récolte mécanisée du maïs à Terra Nova do Norte (NDVI², juin 2003)

Si les chiffres sont bien supérieurs à ceux obtenus pour le soja, y compris pour les valeurs mensuelles seules, certaines similitudes peuvent être observées : globalement le cumul sur l'ensemble du cycle donne des résultats meilleurs ($r=0,85$ pour Nova Mutum pour le cumul MAMJ) et c'est à nouveau les données du município de Campo Novo do Parecis qui apparaissent les moins corrélées. Les graphiques de la figure 2.29 permettent cependant d'avancer des hypothèses explicatives.

MAÏS	Campo Novo P.	Lucas do RV	Nova Mutum
NDVI mars	0.462	0.132	0.578
NDVI avril	0.399	0.708	0.652
NDVI mai	-0.028	0.253	0.706
NDVI juin	0.250	0.266	0.109
NDVI cumul MAMJ	0.423	0.487	0.852
NDVI cumul AMJ	0.316	0.392	0.577
NDVI max Mai-Juin	-0.028	0.253	0.706
NDVI Mai+Juin	0.188	0.271	0.428

Tableau 2.9 : Corrélations entre les rendements de maïs 1999-2003 et différents indicateurs NDVI de SPOT-VGT (en gras, $r>0,4$)

Ainsi, à Campo Novo do Parecis, la valeur résiduelle la plus forte (à gauche sur le graphique) est celle de l'année 2001 où les rendements apparaissent particulièrement élevés (plus de 30 quintaux/hectare) en regard du NDVI. Or, en analysant dans le détail les statistiques agricoles de Campo Novo, on constate qu'en 2001 la surface plantée en maïs a été bien supérieure (19000 ha) qu'en 2000 (16000ha) ou 2002 (10000ha) ; en revanche les surfaces en soja sont plus faibles en 2001 (283000ha) qu'en 2000 (291000ha) ou 2002 (300000ha). Il est donc probable que dans ce cas les rendements de maïs de l'année 2001 intègrent une part plus importante de maïs-safrá (cultivé en partie aux dépens du soja) dont les rendements sont plus élevés que ceux du maïs-safrinha.



Une explication similaire peut être avancée pour Lucas do Rio Verde dont la valeur résiduelle principale (2002, à gauche sur le graphique) correspond à une année où les surfaces en maïs ont presque doublé (122000ha) par rapport à 2001 (77000ha). On remarque aussi dans ce cas que la corrélation est meilleure avec le seul mois d'avril, ce qui peut correspondre aux pratiques culturales originales expérimentées à Lucas do Rio Verde et Sorriso avec une safrinha plus précoce et le développement de l'irrigation, suppléant la modicité des précipitations de fin de saison pluvieuse.



Photo 2.7 : Pivot d'irrigation à Sorriso (NDVI², juin 2002)

Ainsi, si les synthèses mensuelles de NDVI fournies par SPOT-VGT permettent bien de suivre les variations spatio-temporelles du comportement du couvert végétal, il n'est pas aussi évident de faire le lien avec les données agricoles. Les corrélations préliminaires présentées ici entre les rendements et les NDVI montrent des différences importantes entre les types de cultures et d'un município à l'autre. Les résultats sont parfois difficiles à interpréter en l'état des données disponibles et nécessiteront donc des investigations complémentaires sur le terrain. Un travail plus approfondi devrait notamment être mené au niveau des exploitations, ou groupes d'exploitations, avec des données pluviométriques et des suivis de rendements plus détaillés. Dans ce cas, la meilleure résolution spatiale des données MODIS et une approche infra-mensuelle (décadaire) seraient également mieux adaptées à cette approche à plus grande échelle.

Conclusion :

Le climat est bien au cœur des préoccupations quotidiennes des individus et des sociétés et contribue fortement à caractériser le milieu géographique et, au total, le géographe climatologue dispose en parallèle d'une quantité phénoménale d'informations diversifiées et complémentaires fournies notamment par les satellites. Notre atmosphère est auscultée en permanence et à plusieurs niveaux et des moyens considérables sont mis en oeuvre dans cette perspective : **ainsi les champs pluviométriques peuvent être assez bien décrits par les enregistrements géostationnaires et avec une précision pluri-kilométrique, éventuellement complétée par des données géographiques (altitude, latitude, etc...).** Le couvert végétal est, de son côté, bien suivi dans son développement phénologique, en partie sous le contrôle du forçage pluviométrique, comme dans les ruptures (déforestation) imposées par l'Homme. Cependant, en général, les deux types d'études sont menées séparément, détection du changement anthropique d'un côté, détection de l'impact du climat de l'autre. Nous avons déjà démontré en Bretagne que les choses n'étaient pas si simples et ces études se poursuivent dans le cadre d'un PRIR dont les premiers résultats montrent **qu'il n'est pas simple de faire la part de ce qui relève du climat et de ce qui revient des pratiques culturelles dans les variations du signal satellitaire.**

On aurait pu penser qu'au Mato Grosso, les choses sont plus simples en raison de la moins grande diversité des cultures pratiquées, de la plus grande taille des parcelles, du moindre fractionnement du paysage, de la supposée plus grande monotonie du climat tropical. Cependant plusieurs choses viennent complexifier le problème :

- plus grande imprécision des données de terrain (statistiques agricoles et données pluviométriques notamment)
- plus grande difficulté à aller rapidement « sur le terrain » contrôler ces erreurs ou interpréter correctement une donnée satellitaire
- une diversité plus grande que ce que l'on peut imaginer des pratiques culturelles comme des conditions pluviométriques qui rendent délicates la mise en relation des facteurs climatiques et anthropiques.

Au total, les bases de données constituées, présentées et analysées dans le cadre de ce travail sont encore loin d'avoir été exploitées de manière exhaustive. Il faut notamment faire converger sur le plan spatial les approches pluviométriques à échelle « fine » (kilométrique), les synthèses d'indices de végétation et les données culturelles. Cette approche peut être menée au niveau de l'ensemble des régions agricoles du Mato Grosso mais **les résultats préliminaires montrent la nécessité de s'appuyer sur des analyses plus fines sur le plan spatial :** échelle infra-municipale (secteurs censitaires de l'IBGE ou ensembles d'exploitations agricoles), réseau pluviométrique plus dense (à mettre en place en collaborant avec des centres de recherches sur place), données satellitaires à meilleure résolution (MODIS).



Photo 2.8 : Arrivée d'un orage en début d'après-midi sur la Chapada dos Parecis
entre Tangara da Serra et Campo Novo do Parecis (*V.Dubreuil, juin 2001*)

3^e partie

**DE L'OBSERVATION A LA
MODELISATION :
L'IMPACT DU FRONT PIONNIER SUR
LE CLIMAT**



Photo 3.1 : Formation d'un panache nuageux cumuliforme à partir d'un feu de défrichage à l'est de Sinop (P.Marzin & V.Dubreuil, juin 1999)

Introduction

*« Irréversibilité du temps, sans laquelle toute science sociale perdrait son mystère, sans doute sa raison d'être. Aussi le regard du géographe se porte-t-il, quand il le faut, vers le passé ; et, quand il le faut, vers nos devenirs possibles. L'horizontal ne peut occulter le vertical. »
(Péguy, 2001)*

Les décennies 70 et 80 ont été marquées par le recul rapide des surfaces occupées par les forêts tropicales. La première partie a montré que le cas du Mato Grosso était très révélateur de cette évolution en raison de l'étendue des surfaces conquises par l'agriculture aux dépens de la forêt et du fait de la diversité des paysages préexistants et des formes actuelles de mise en valeur. Dans la mesure où ces transformations s'opèrent rarement de façon complètement spontanée et anarchique, il doit être possible d'identifier des structures spatiales suffisamment récurrentes pour que l'étude de toute cette région se prête à une démarche modélisatrice. Il s'agit donc ici de définir ces configurations spatiales types, leurs logiques de fonctionnements et leurs évolutions dans le temps. Le but ultime est de proposer, à partir des états de l'occupation du sol actuels et passés, les états possibles dans le futur dans le cadre d'une démarche prospective.

La modélisation envisagée vise aussi à mieux comprendre les conséquences des changements d'occupation du sol sur le climat. Encore faut-il disposer de données originales in-situ qui permettent de quantifier ces phénomènes. Mes recherches ont donc d'abord porté sur les changements climatiques locaux de type urbains observables au moyen de stations météorologiques « légères » ; s'il s'agit bien de changements climatiques anthropiques, les observations réalisées au Mato Grosso ne sont cependant originales que dans la mesure où les villes sont très récentes et en croissance rapide (première partie). Le plus difficile est de passer de ces observations ponctuelles (rural-urbain, forêt-pâturage) à une quantification à l'échelle régionale des conséquences climatiques du changement d'occupation du sol ; dans ce cas le phénomène urbain est mineur par rapport au processus de déforestation qui concerne des espaces plus vastes. La difficulté de la validation est aussi posée par l'impossibilité de mettre en place un réseau dense d'observation climatologique à l'échelle régionale, seuls quelques points de « calage » du modèle étant disponibles.

Ma démarche nécessite alors le recours aux travaux d'autres disciplines pour mener à bien les processus de modélisations : collaborations avec des sociologues, des politistes ou des économistes pour la modélisation de la dynamique du front pionnier, collaborations avec des physiciens pour la modélisation des conséquences de la déforestation sur le climat. Mon approche de géographe essaie de faire converger les approches respectives de chaque discipline pour comprendre les dynamiques spatio-temporelles observées dans cette région ; en ce sens, il s'agit de mieux comprendre que, « *Si la temporalité repose (en grande partie) sur une métrique, quelle part relative les métriques physiques et les métriques sociales jouent-elles dans le fonctionnement des systèmes géographiques ?* » (Baudelle & Regnauld, 2004).

3.1. Modéliser la dynamique du front pionnier :

311. L'importance des facteurs économiques

Les changements d'utilisation du sol constatés dans de nombreuses régions du monde (figure 3.1) ont amené les géographes à se préoccuper des facteurs qui contrôlent ces changements. En effet, identifier ces facteurs permet de comprendre les dynamiques en cours mais aussi de les modéliser pour bâtir des scénarii prospectifs d'évolution des territoires. Ce type de simulation a un intérêt scientifique mais aussi politique car il permet d'anticiper des futurs possibles pour des territoires en pleine expansion (Alves et al., 1992). Les enjeux transcendent donc les disciplines et la seule communauté scientifique et, dans le cas des forêts tropicales, des résultats très divers ont pu être exposés.

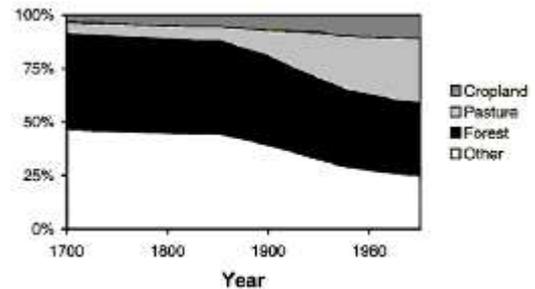


Figure 3.1 Estimation des changements d'utilisation du sol dans le monde de 1700 à 1995 (d'après Lambin et al., 2001)

En Afrique Centrale, Zhang et al. (2005) ont montré que la déforestation était significativement liée à la densité de la population rurale. De même pour Tole (2002) en Jamaïque où la croissance de la population et la pauvreté sont les moteurs de la destruction de la forêt. Le lien entre déforestation et pression démographique a aussi été fréquemment établi pour l'Amazonie (Imbernon, 1999 et 2000). Dans ce cas cependant, la cartographie des marqueurs du front pionnier de l'arc de déforestation (les Brésiliens parlent de *a meia-lua*, la demi-lune, H.Théry, 1997) montre l'importance de la démographie (migrations, part des 15-64 ans, taux de masculinité) mais aussi des facteurs économiques (élevage, pâturages, taille des exploitations, part des salariés agricoles). Ainsi, dans le cas de la déforestation tropicale, les rôles décisifs de la pression démographique et de la pauvreté apparaissent comme des explications trop simples (Lambin et al., 2001). Ces facteurs jouent un rôle mais ils sont souvent secondaires par rapport aux stratégies économiques individuelles des acteurs locaux et nationaux (l'exemple du Mato Grosso montre que bon nombre de colons ont déjà un capital), aux choix politiques des Etats (Gesit & Lambin, 2002), à leur nécessité de mettre en valeur des territoires pour exporter des matières premières ou agricoles (fer, soja pour le Brésil) et récupérer des devises : « *global forces become the main determinants of land-use change, as they amplify or attenuate local factors* » (Lambin et al., 2001).

De même une place importante, à juste titre, a été attribuée aux effets des actions publiques : ainsi, dans le cas de l'Amazonie, les contrastes dans l'intensité de la déforestation entre les différents pays du bassin semblent relever davantage des stratégies nationales que des facteurs démographiques (Perz et al., 2005).

Au Brésil, de nombreux auteurs ont insisté sur l'importance du développement d'infrastructures comme l'ouverture de routes à travers l'Amazonie ou l'asphaltage des pistes existantes : Laurence et al. (2001) ont ainsi proposé des cartes simulant de manière plus ou moins « pessimiste » (pour la forêt) l'impact du plan « Avanço Brasil » (prévoyant notamment l'asphaltage de 6245km de routes). Selon Laurence et al., les conséquences seraient un défrichement de 120 à 270000km² défrichés d'ici 2020. Dans le même temps, ce seraient chaque année 1,53 à 2,57 millions d'hectares de forêts supplémentaires à être transformées en forêts fortement dégradées. Selon eux, à cette date, 25% de l'Amazonie Légale sera alors déforestée et 40% au moins partiellement dégradée (figure 3.2).

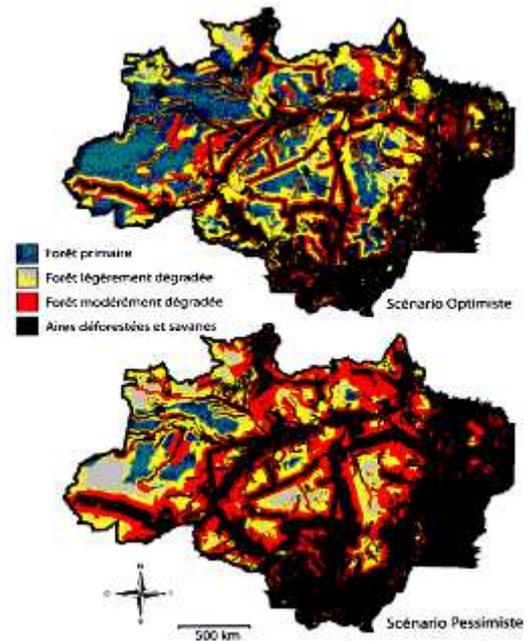


Figure 3.2 : Simulations de l'Amazonie légale en 2020 (d'après Laurence et al., 2001 in Durieux, 2002)

Ce constat explique qu'un nombre important de modèles développés ces dernières années aient mis l'accent sur la prise en compte des facteurs économiques notamment de coûts de transport, de production,... (Kaimowitz & Angelsen, 1998 ; Andersen & Reis, 1997). Comme pour les études sur le changement climatique global, des scénarii de développement économique (« Business as usual », « governance », « ecological »,...) ont été proposés et ce sont leurs effets qui sont ensuite testés dans des modèles régionaux (figure 3.3).

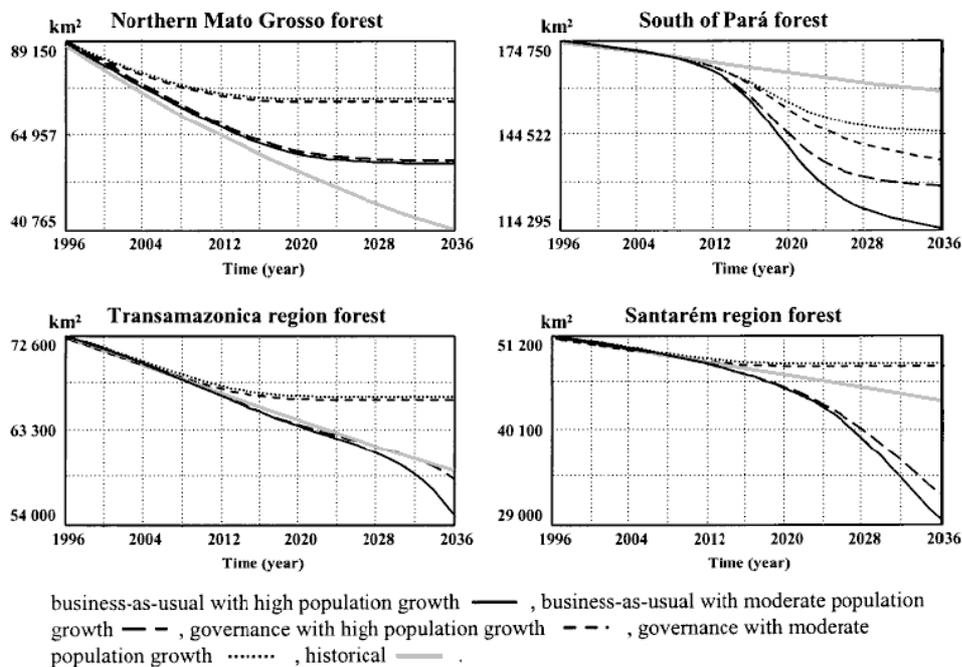


Figure 3.3 : Diminution de la couverture forestière pour 4 scénarii et sous-régions amazoniennes (source : Soares Filho et al., 2004)

Parmi les premiers modèles à avoir été développé, le modèle DELTA (Dynamic Ecological – Land Tenure Analysis) proposé par Dale & al., 1993, résume la complexité des processus en œuvre quand on cherche à modéliser la déforestation. Les travaux portent sur la région d'Ouro Preto, Rondônia. « *DELTA can be classified as a stochastic, dynamic micro-simulation model (...). The basic premise underlying the model is that deforestation is a socioeconomic process* ». Ce modèle tente de coupler le processus de colonisation agricole, les changements d'occupation du sol et les rejets de carbone. A l'échelle des lots, les paramètres apparaissant les plus discriminants (d'après l'étude statistique des interviews réalisées) sont la qualité des sols, la distance aux marchés, la période d'occupation du lot par son propriétaire, la taille des lots et les orientations agricoles. Ce modèle peut prendre en compte différents types de scénarii et notamment les choix de développement (plus ou moins 'durable') adoptés par les colons ; l'impact des maladies sur le temps de travail effectif des colons est apparu a posteriori comme un paramètre important à prendre en compte. La 'qualité des sols' est particulièrement discriminante car même si « *Rondônia was selected for the colonization programs based on its exceptionally good soils for the Amazon basin, in reality, the soils range from good to unsuitable for agriculture.* ». Les auteurs remarquent d'ailleurs ironiquement que dans cette région, les meilleures terres portent essentiellement de l'élevage d'embouche alors que le schéma de colonisation prévoyait des cultures pérennes adaptées aux sols de bonne qualité. Les simulations démontrent que dans ce cas, la déforestation sera achevée après 4 décades de colonisation. Les comparaisons entre le modèle et la déforestation observée avec Landsat montrent une bonne correspondance pour les principaux critères retenus : pourcentage déboisé, dimension fractale notamment. La plupart des différences observées relèvent des conditions spécifiques internes à chaque lot (micro-topographies, zones humides ; Frohn & al., 1996).

Dans la pratique, on doit effectivement considérer que « *la déforestation n'est pas une politique définie, mais la résultante d'un grand nombre d'efforts individuels qui vont dans le même sens* » (Le Tourneau, 2004). Ainsi, d'abord rapide lors de l'installation des colons sur leur lot, la déforestation, à l'échelle de la propriété devient rapidement un phénomène plus complexe, largement tributaire des stratégies individuelles de chaque famille (Mac Cracken et al., 1999). Les résultats de ces derniers, obtenus dans la région d'Altamira (Para) sur la Transamazonienne, montrent une situation bien différente de celle que l'on peut observer dans le nord du Mato Grosso : la proportion des superficies en repousse forestière est importante (de l'ordre de 20% de la surface des lots) et la distance à la ville principale n'y apparaît pas comme un facteur décisif favorable à la déforestation. Ces auteurs soulignent surtout que les facteurs explicatifs changent en fonction de l'échelle à laquelle on les analyse : « *access to water, distribution of soils and distance to markets appeared to be important to the pattern at a landscape level, but not at the property level* ». Dans le cas du Mexique, Mas (1998) souligne ainsi les difficultés d'intégrer les interactions entre processus de différentes échelles : l'échelle locale ne rend pas compte du contexte national ou international car les causes de la déforestation ne sont pas forcément les mêmes à l'échelle locale ou nationale. Une des questions majeures posées au géographe est donc de traduire et formaliser spatialement les dynamiques socio-économiques observées en intégrant de façon variable les facteurs en fonction du niveau scalaire.

322. Du global au local : la traduction spatiale des dynamiques socio-économiques

L'observation satellitaire à différentes échelles a permis à de nombreux auteurs d'identifier des formes spatiales récurrentes de la distribution des secteurs défrichés et non défrichés, militant en faveur d'une possible modélisation de ceux-ci. Résumés par Mertens & Lambin (1997) en 6 formes élémentaires (figure 3.4), ces modèles, au delà de l'observation, montrent le rôle déterminant à l'échelle locale et régionale des foyers de population (villes) et des voies de communication. Adaptés dans le cas du Mato Grosso par Clairay (2003), ces modèles se retrouvent sur les images des satellites Landsat.

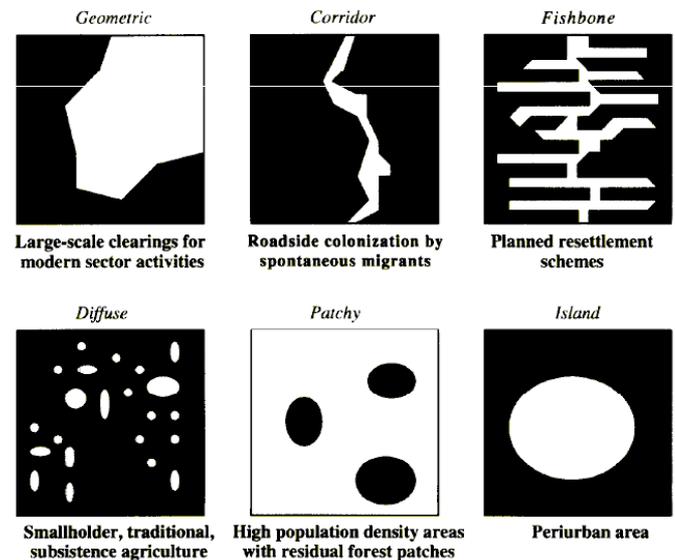


Figure 3.4 : Types d'organisations spatiales forêt/non-forêt et leur interprétation en terme de processus (source : Mertens & Lambin, 1997)

Landsat 7 ETM+ : 226-67 . 19 août 1999 . CC 4.5,3

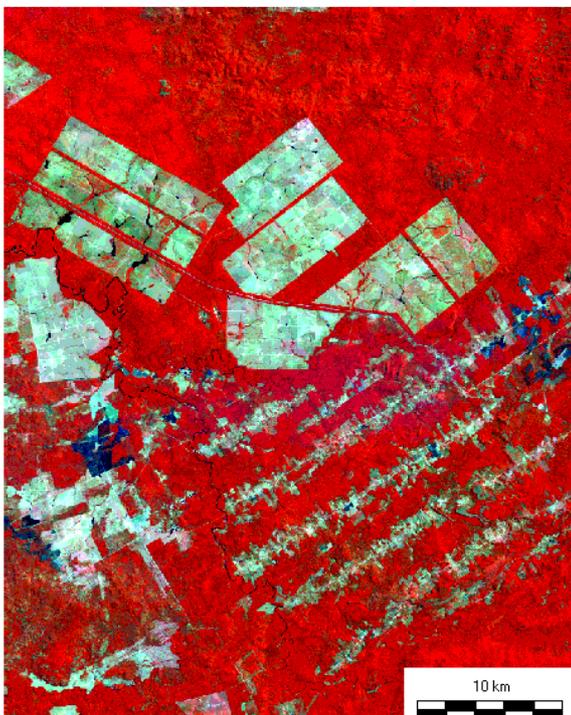


Figure 3.5 : Opposition entre grandes fazendas d'élevage (au nord-ouest) et des petites propriétés selon le schéma en arrêtes de poisson sur le município de Peixoto de Azevedo



Figure 3.6 : Défrichement en vaste clairière autour de Claudia



Figure 3.7 : Défrichement généralisé et forêts galeries résiduelles autour de Lucas do R.V.

Ainsi, à Peixoto de Azevedo, l'opposition est saisissante entre les grandes fazendas de la Société Cachimbo et, à quelques kilomètres de là, les assentamentos où l'on retrouve le schéma en arrêtes de poisson des petites propriétés. Le modèle de défrichement en grandes parcelles est très commun dans le Mato Grosso, aussi bien pour les grandes cultures mécanisées du soja (voir 1^e partie) que pour les fazendas d'élevage extensif, comme dans une bonne partie de l'est de l'Etat entre le bassin du Xingu et l'Araguaia, (São José do Xingu). De forme le plus souvent massive et géométrique, ces vastes propriétés ont souvent plus de 10000 hectares et apparaissent sur les images satellites comme autant de clairières artificielles au sein du domaine forestier (en bleu sur la figure 3.5). Ce type de propriété est généralement spécialisé dans l'élevage de race Nelore (production de viande bovine), l'essentiel de l'occupation du sol étant donc des pâturages. Le sort de ces exploitations est très variable en fonction de la qualité des terres (ou de la vitesse à laquelle les sols s'épuisent...), de l'entretien des prairies (importance des « mauvaises herbes »), du suivi du cheptel et de la commercialisation de la viande (Mertens et al., 2002 ; Poccard-Chapuis et al., 2002 ; de Castro, 2002).

Ce premier type s'oppose nettement aux secteurs de colonisation publique de l'INCRA (Institut National pour la Colonisation et la Réforme Agraire), très communs dans le Rondônia mais plus rares dans le Mato Grosso. Un bon exemple est fourni par Carlinda, município situé à 30 kilomètres à l'est d'Alta Floresta, où un PAC (*Projeto de Assentamento Conjunto*) a été mis en place en partenariat entre l'INCRA et la Cotia. Dans ce deuxième type, des lots de 50 hectares sont distribués à des familles de colons qui pratiquent une agriculture vivrière sur brûlis (manioc, riz) et quelques cultures spéculatives (café le plus souvent dans la région). D'abord concentrés en bordure de piste (figure 3.8), les défrichements gagnent progressivement vers l'intérieur du lot et forment alors une géométrie en « arrêtes de poisson » très caractéristique. Chaque famille défrichant 2 à 3 hectares par an, les lots sont presque entièrement défrichés au bout d'une vingtaine d'années.

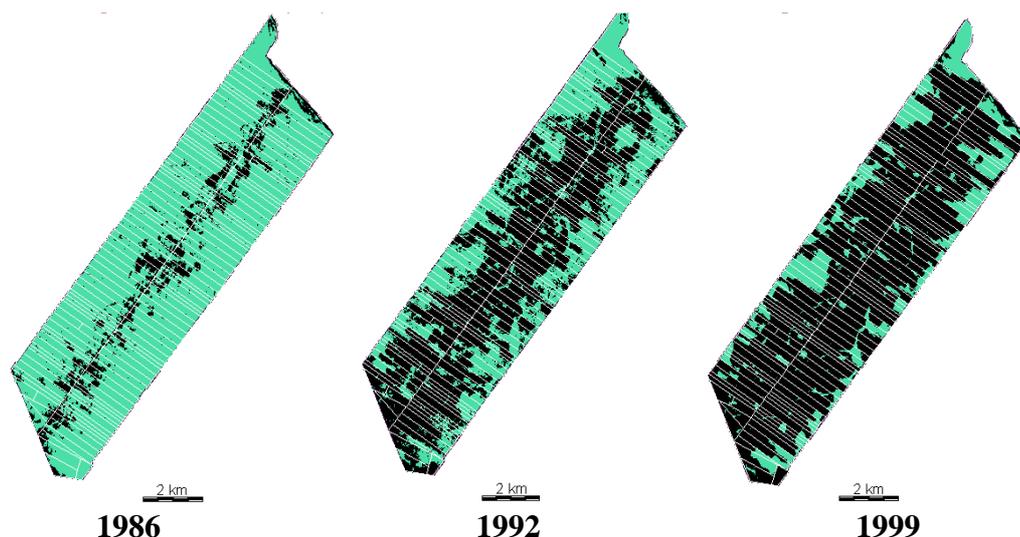


Figure n°3.8 : Evolution de la déforestation dans la ligne 13 de l'Assentamento de Carlinda : exemple du rôle des routes dans le modèle linéaire de type « arrêtes de poisson » (forêt en vert, défriché en noir ; $NDVi^2$)

Un dernier type de configuration spatiale de défrichement est illustré par le município de Claudia (figure 3.6), au nord-est de Sinop. Dans ce cas, les parcelles défrichées se concentrent très nettement autour de l'agglomération alors que la périphérie est plus forestière. A plus petite échelle on retrouve l'impression de clairière abordée dans le premier type mais ici la structure spatiale est plus aboutie avec le centre urbain puis l'espace rural d'autant moins défriché que l'on s'éloigne du centre. On préférera dans ce cas parler de forme de défrichement en îlot.

A terme, les pressions exercées sur la forêt et le cerrado peuvent conduire à une réduction dramatique de leurs étendues comme dans le centre sud de l'Etat (Lucas do Rio Verde, Sorriso) où la colonisation agricole est déjà un peu plus ancienne et où elle a pu se réaliser dans de bonnes conditions. La qualité de la desserte routière, les structures techniques (machinisme) et socio-économiques (grandes entreprises agroalimentaires et coopératives) ont entraîné une mise en valeur agricole quasi généralisée de l'espace disponible (figure 3.7). Les interfluves des plateaux sont ainsi entièrement consacrés aux cultures et pâturages et la forêt n'a été maintenue que le long des cours d'eaux et dans quelques réserves. Ces régions préfigurent d'une certaine façon le devenir des régions pionnières en cours de mise en valeur du Mato Grosso.

Pour résumer, on peut dire qu'à l'échelle locale les données Landsat TM permettent de distinguer les structures linéaires et les effets clairière (ou d'îlots) qui soulignent l'importance des routes et des centres urbains dans le processus de déforestation.

L'importance des voies de communication : exemple de la BR-163

Longtemps explorée et exploitée par les fleuves, l'Amazonie est, depuis un demi-siècle, essentiellement mise en valeur à partir des routes, surtout dans sa partie méridionale. Les grands travaux routiers lancés par l'Etat brésilien (Transamazonienne, Brasilia-Belem, Cuiaba-Porto Velho-Rio Branco, Cuiaba-Santarem, pour les principales) ont été des axes majeurs à partir desquels un réseau secondaire a permis la pénétration et l'installation des colons dans la forêt (figure 3.9). Ainsi, un premier niveau de voies de communication peut être distingué dans le Mato Grosso constitué de routes asphaltées : les BR (routes fédérales) 364 et 174 qui traversent le Mato Grosso d'est en ouest pour relier le Rondônia au sud du pays, la BR 163 qui relie Cuiabá à Santarem et qui traverse l'Etat du sud au nord, secondairement, on peut mentionner la BR 158 (asphaltée pour moitié) qui dessert la partie est de l'Etat du nord au sud également.

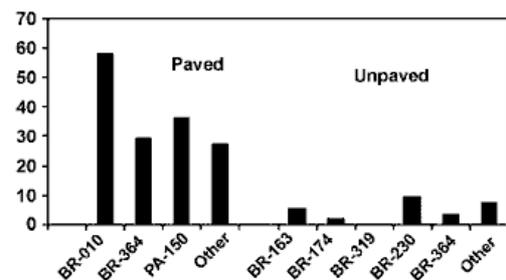


Figure 3.9 : Pourcentage de déforestation de part et d'autres des principales routes amazoniennes asphaltées (à gauche) et en terre (à droite). La BR-163 n'est asphaltée que dans le Mato Grosso, l'essentiel de son tracé (dans le Para) étant en terre. *Source : Carvalho et al., 2004*

Le cas de la BR-163 est particulièrement emblématique de l'importance des routes au travers de l'Amazonie ; il a été l'objet de plusieurs études dont une à laquelle j'ai participé sous la responsabilité de P.Mendez du Cirad et en collaboration avec l'Embrapa (C.Maggri) et le Centre de Développement Durable de Brasilia (N. de Mello). Cette route a été ouverte entre 1970 et 1974 par l'armée brésilienne : les travaux ont été réalisés à partir du Mato Grosso par le 9ème BEC (*Batalhão de Engenharia e Construções*) et à partir de Santarém par le 8ème BEC, chaque bataillon ayant la responsabilité de la moitié de l'ouvrage. La piste a été inaugurée en 1974 et son asphaltage est actuellement quasiment terminé dans le Mato Grosso. La figure 3.10 montre que, dans cet Etat, la répartition des espaces défrichés obéit à une loi log, la moitié des terres étant défrichées sur 30 kilomètres de part et d'autre de la route contre 20% à une centaine de kilomètres.

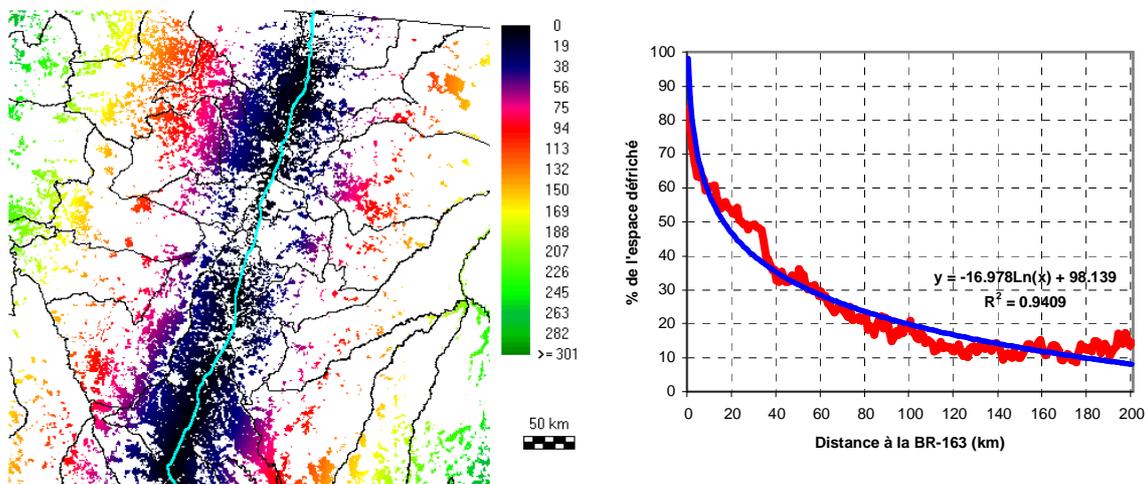


Figure 3.10 : La déforestation de part et d'autre de la BR-163 dans le Mato Grosso. A gauche, distance (en kilomètres) à la route des espaces défrichés. A droite, fraction de l'espace défriché en fonction de la distance à la BR-163

Les 1000 kilomètres de l'Etat du Para ne sont pas encore asphaltés mais de nombreux acteurs politiques et économiques souhaitent qu'ils le soient rapidement. Parmi les partisans de ces travaux figurent les producteurs de soja du centre du Mato Grosso qui voient ainsi l'opportunité d'exporter leur production à moindre coût : en effet, le port de Santarém est bien plus proche de Sinop (et des marchés d'Europe et d'Amérique du Nord) que Santos ou Paranaguá (débouchés actuels du soja matogrossense). L'asphaltage de cette route est donc un enjeu considérable, non seulement pour l'Etat du Para qu'elle traverse, mais aussi pour le Mato Grosso. De nombreux producteurs du centre du Mato Grosso (Sorriso, Lucas, Sinop) ont d'ailleurs anticipé cette réalisation et ont commencé à acquérir et défricher des terres dans le sud du Para dans les municípios de Novo Progresso et Castel dos Sonhos.

Soares-Filho et al. (1998, 2001, 2004) ont inclus dans leur modèle DINAMICA (fonctionnant sur le principe des automates cellulaires) l'asphaltage de cette route et comparé un scénario de type « Business as usual » (maintien des tendances et des processus constatés depuis 30 ans) et un de type « gouvernance » (mesures

environnementales, systèmes de production « durables » et forte protection des réserves). La figure 3.11 montre les différences ainsi modélisées le long de la BR-163 entre Sinop et Santarém.

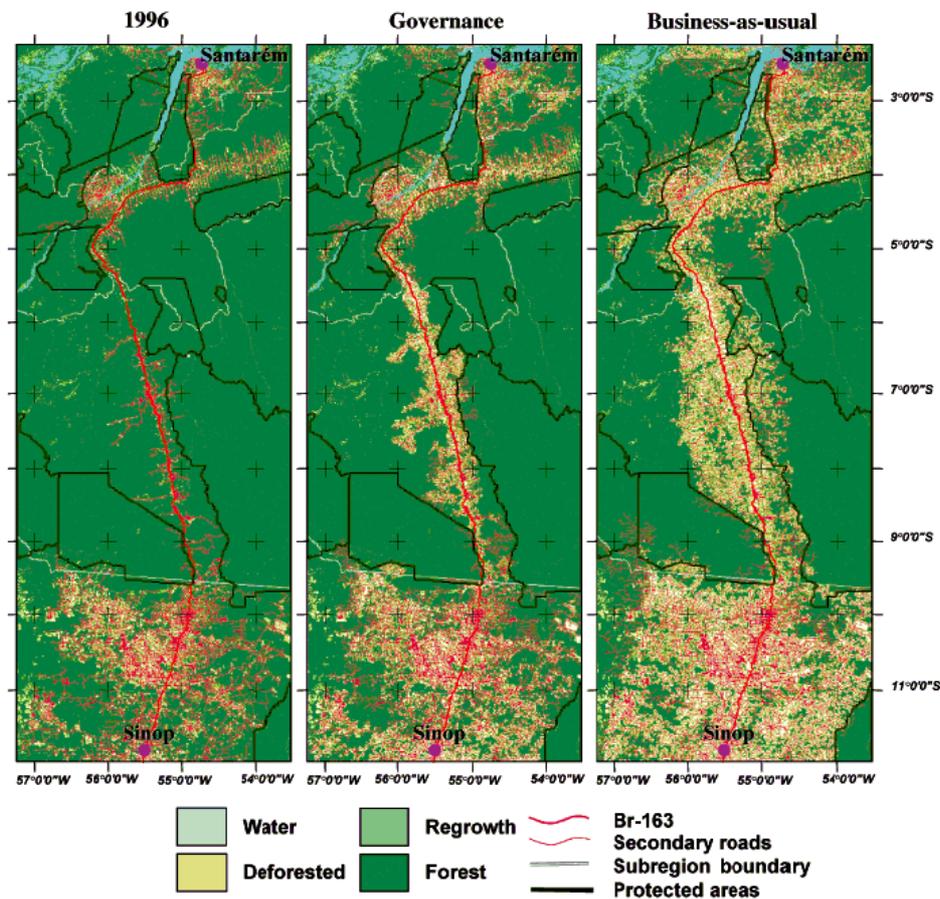


Figure 3.11 : Sorties du modèle DINAMICA sur l'évolution de l'occupation du sol 1996-2026 le long de la BR-163 selon 2 scénarii (source : Soares Filho et al., 2004)

Outre ces grands axes nationaux comme la BR-163, un réseau de pistes principales reliant entre eux les principaux centres urbains existe également. Leur entretien est plus aléatoire mais ces axes jouent un rôle important de desserte des zones pionnières du nord de l'Etat. La première étape de la colonisation agricole est en effet l'ouverture de voies de communications terrestres. Les pistes, plus ou moins praticables en saison des pluies, se dégradent rapidement mais permettent l'arrivée et l'installation des colons. En outre, l'entretien de ces axes est essentiel pour la survie des exploitations (échanges et commercialisation des produits agricoles). Dans la mesure où les défrichements se concentrent d'abord à proximité des routes et des pistes, on peut considérer que la distance à ces axes constitue donc un facteur décisif à prendre en compte par la modélisation (figure 3.12). Ainsi, dans ses travaux sur la région de Campeche au Mexique, Mas (1998) a retenu, par ordre d'importance décroissante les variables : distance par rapport aux chemins, distance par rapport aux routes, distance par rapport aux agglomérations, altitude, pente... Le coefficient de prédiction obtenu par le modèle était de 0,45. On peut alors construire deux images de distances par rapport à ces voies de communication principales et secondaires.

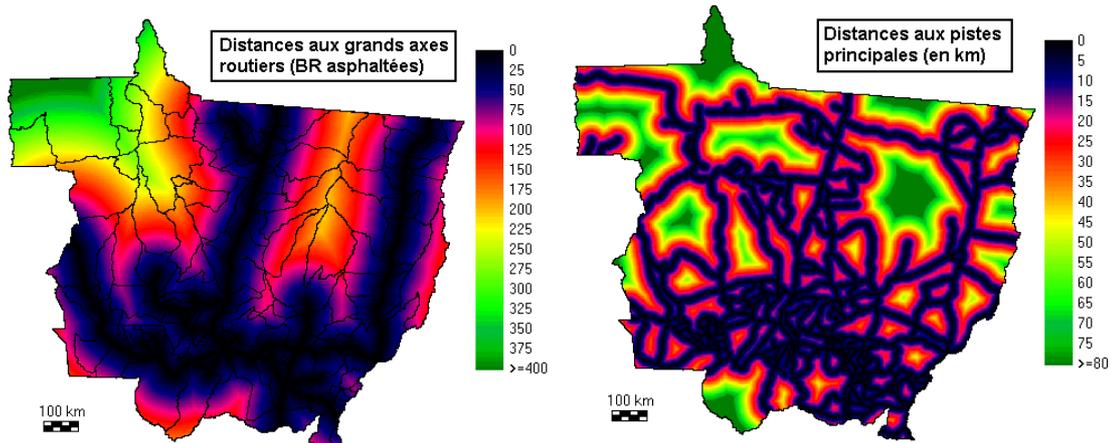


Figure 3.12 : Carte des distances par rapport aux routes asphaltées (à gauche, en km) et aux pistes principales (à droite, en km, avec une légende différente)

Distances aux villes :

« Toute augmentation de la population entraîne une pression des zones plus internes sur les plus externes, qui reculent. L'étymologie même du latin *saltus* suggère le bond, la progression. Le moindre défrichement est dynamique » (Péguy, 2001). Le deuxième facteur à prendre en compte est la distance aux villes dont le rôle a été souligné au Brésil (Laurence et al., 2002) comme à Porto Rico (Helmer, 2004) ou au Cameroun (Mertens & Lambin, 1997, 2000), par exemple. La colonisation agricole dans le Mato Grosso s'accompagne, en effet, d'un important essor urbain (1^e partie) avec une hiérarchisation très nette entre une vingtaine de villes dépassant 20000 habitants et polarisant le territoire, et une centaine d'autres, centres administratifs élémentaires (130 préfectures de município en 1998). Leur taille et leur dynamisme sont assez variables entre les vieux centres historiques assoupis (Vila Bela) du sud et les nouvelles agglomérations de la zone pionnière en pleine croissance (Apiacas). Comme pour le réseau routier, une première approche spatiale consiste à utiliser les potentialités des SIG (Silveira et al., 2001 ; Mertens et al., 2001) pour calculer la distance par rapport à ces 2 types de centres urbains (figure 3.13).

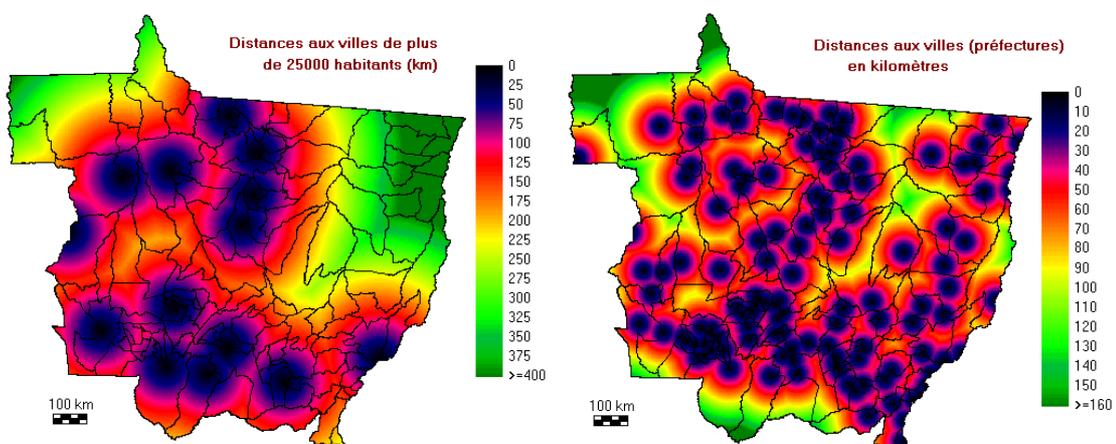
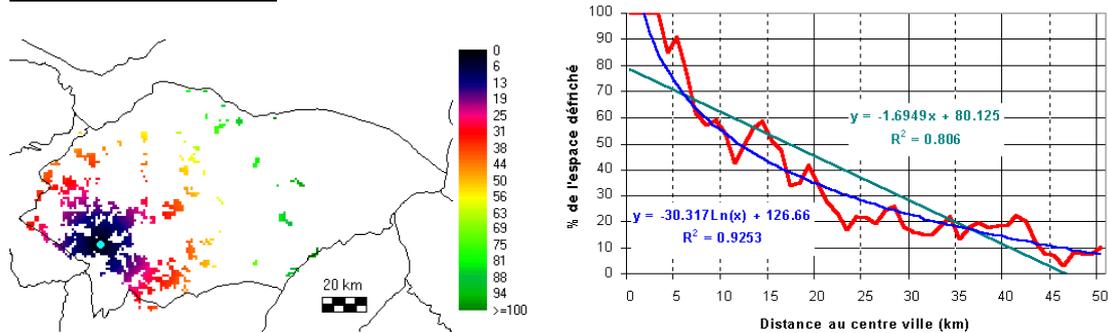


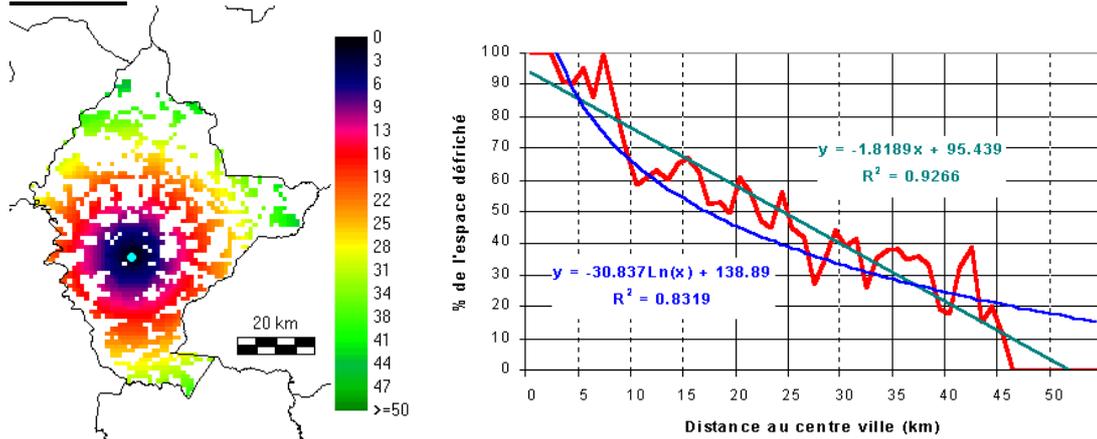
Figure 3.13 : Carte de distances par rapport aux villes principales (à gauche, en km) et aux préfectures (à droite, en km, avec une échelle adaptée) : situation 1998

Dans le détail, l'étude des surfaces défrichées en fonction de la distance au centre urbain du município laisse apparaître une fonction d'ajustement souvent de type log mais aussi un gradient sud-nord (figure 3.14). Ainsi, à Lucas do Rio Verde, plus de 70% de l'espace est défriché jusqu'à 35 kilomètres de la ville ; à Sinop il faut aller à 25 kilomètres de la ville pour trouver une proportion d'espace défriché supérieure à 50% contre 15 pour Marcelandia. La proportion d'espaces défriché varie également en fonction de la taille de la ville (figure 3.15).

MARCELANDIA :



SINOP :



LUCAS do RIO VERDE :

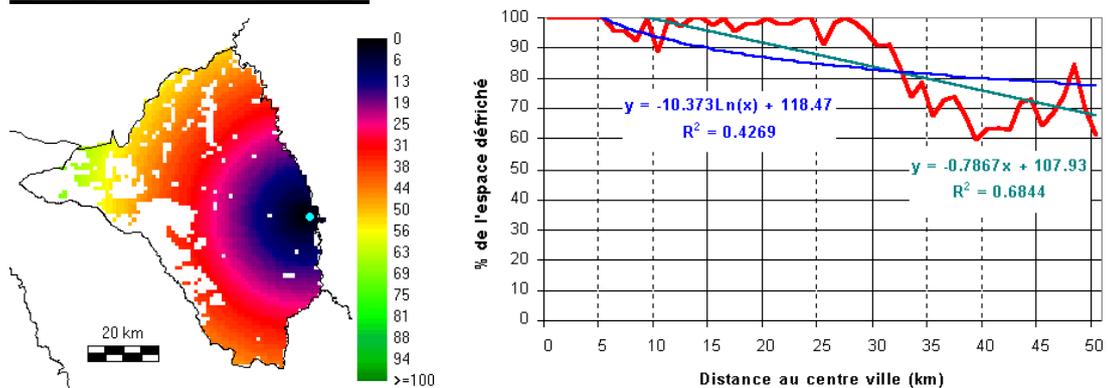


Figure 3.14: Distance aux villes et déforestation selon un gradient Nord (Marcelandia, en haut) Sud (Lucas do RV, en bas) en passant par Sinop (au milieu). A gauche, carte des espaces défrichés en fonction de leur distance à la ville (la forêt est laissée en blanc) ; à droite, pourcentage de l'espace défriché en fonction de la distance à la ville

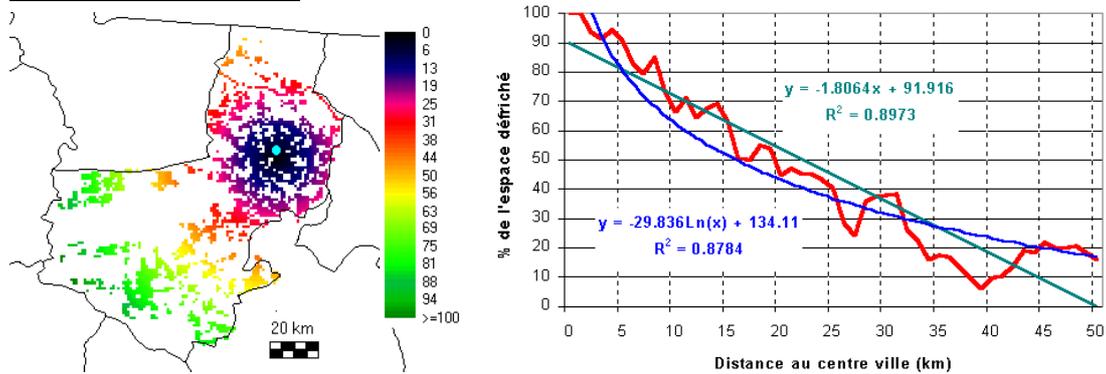
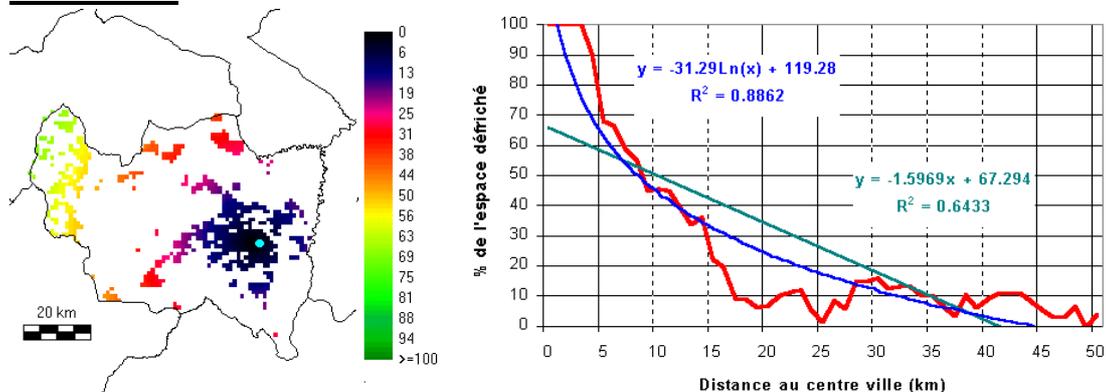
ALTA FLORESTA :**CLAUDIA :**

Figure 3.15 : Distance aux villes et déforestation à Alta Floresta (46000 habitants en 2000) et Claudia (10200 habitants en 2000). A gauche, carte des espaces défrichés en fonction de leur distance à la ville (la forêt est laissée en blanc) ; à droite, pourcentage de l'espace défriché en fonction de la distance à la ville

A partir des quatre cartes élémentaires des figures 3.12 et 3.13 ainsi construites, on peut proposer une synthèse par simple addition pour tous les points des distances par rapport aux pistes, routes, villes et préfectures. Il est possible de pondérer à loisir chacune des distances afin de mieux prendre en compte tel ou tel facteur, mais il s'agit ici de montrer si des combinaisons simples peuvent suffire pour modéliser la déforestation dans cette région. La présence de zones protégées (terres indiennes, parcs et réserves) doit aussi être intégrée pour comprendre la moindre déforestation observée dans certains secteurs (bassin du Xingu, ouest du município de Juina). Le résultat de cette synthèse est proposé en figure 3.16, les teintes bleu-noir correspondant à des valeurs faibles (faible éloignement des voies de communication et des agglomérations) alors qu'en vert apparaissent les régions où les distances cumulées sont les plus fortes. Ce type de modèle n'est pas borné dans le temps : construit sur les observations actuelles il ne permet pas de dire que tel secteur sera défriché dans 5, 10 ou 15 ans mais présente les risques potentiels déduits de la situation présente.

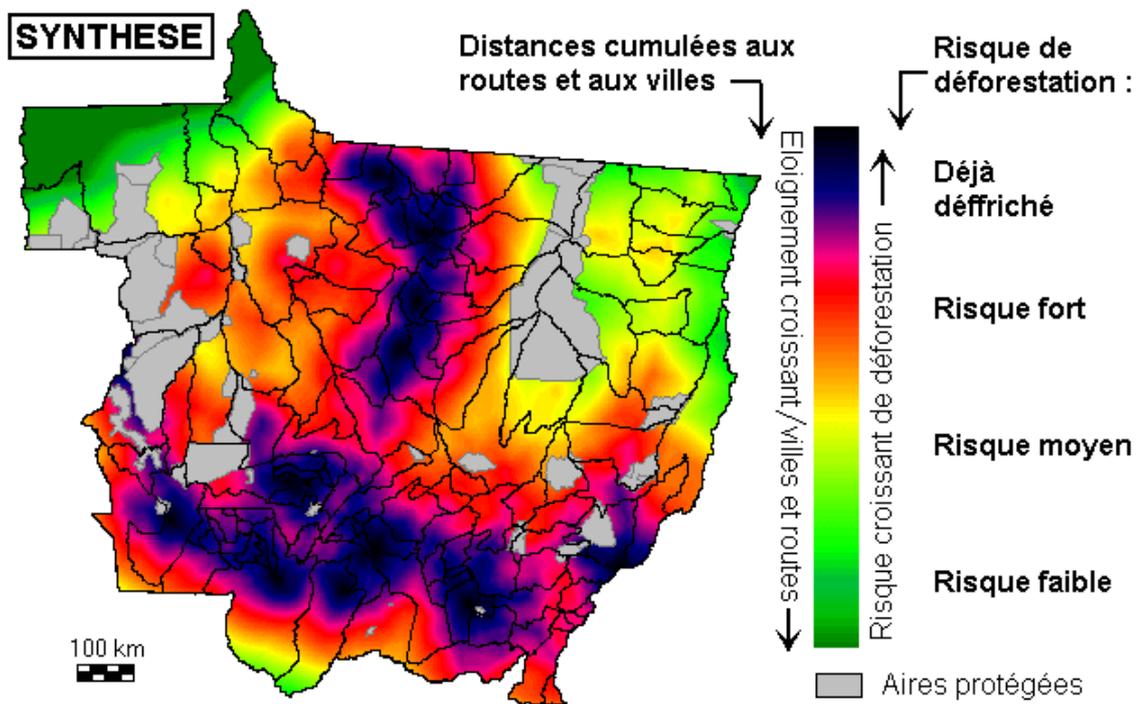


Figure 3.16 : Carte synthétique des risques de déforestation en fonction des distances aux routes et aux villes

Ce type de modèle simple permet d'obtenir rapidement une vue générale des espaces les plus exposés au risque de déforestation. Son adéquation avec les espaces déjà défrichés et surtout ceux défrichés récemment (voir 1^e partie) est intéressante à l'échelle de l'ensemble de l'Etat mais reste insuffisante à l'échelle locale. En effet, en plus l'importance des axes de communication et des centres urbains qui montrent le poids de l'éloignement des marchés (coûts distances-temps), il devient nécessaire de tenir compte des obstacles hydrographiques, de la topographie, de la nature des sols... En outre, en descendant à l'échelle infra-municipale, les stratégies des acteurs locaux deviennent plus importantes à prendre en compte, ce qui soulève de nouvelles difficultés. Ainsi, Mas (1998) insiste sur les points suivants qui rendent la tâche de modélisation ardue :

- Facteurs non prévisibles : innovation, catastrophes naturelles, mouvement démographique (arrivée de Sans Terres)
- Déphasage spatial et temporel entre causes et effets
- Complexité des phénomènes socio-économiques
- Difficulté de modéliser le comportement humain (décalage réalité/perception)
- Manque d'information actualisée de qualité

Enfin, il faut rappeler l'importance de facteurs exogènes au processus de déforestation : contexte économique national et international, facteurs politiques et mouvements sociaux contribuent largement à amplifier ou limiter le rythme global de la déforestation. Une difficulté supplémentaire est que le traitement statistique par régression de la modélisation suppose l'indépendance des variables explicatives retenues. Or, cette hypothèse est rarement vérifiée pour 2 raisons :

- la densité des voies de communication (et leur état) n'est pas indifférente à la distance au siège du município (colinéarité des variables explicatives) et donc à la distance à la ville ;
- il existe une forte autocorrélation spatiale des espaces déboisés : en effet, la probabilité d'occurrence d'un pixel déboisé augmente à proximité d'un secteur déjà défriché (processus de diffusion spatiale de la déforestation).

Pour toutes ces raisons, les modèles développés récemment essaient de prendre en compte la diversité des stratégies et des choix possibles au niveau des individus. Ainsi, Bonaudo et al. (2005) utilisent les systèmes multi-agents dans leurs travaux sur le município d'Uruara sur la Transamazonienne. « *La modélisation multi-agent implique d'identifier les comportements de base des acteurs, leurs stratégies, leurs relations et leurs activités au cours du temps. (...) Néanmoins, devant la complexité d'un tel système, notre travail a consisté essentiellement à trier, hiérarchiser et synthétiser l'information disponible. (...) En effet, parce que les potentialités des SMA semblent quasiment sans limite, il est tentant de vouloir y introduire toute la complexité du système réel, au risque de s'y perdre.* » Leurs résultats sur des surfaces élémentaires de 5 hectares, et sur une période de 15 années montrent que le modèle fait émerger les structures sociales, économiques et productives correspondant à six types d'acteurs : « Sans terre », « Survie », « Début d'accumulation », « Planteur », « Éleveur » et « Diversifié ». Le modèle montre la dynamique agraire (effectivement constatée sur le terrain) d'accroissement de l'élevage extensif, malgré une rentabilité à priori bien moindre que la culture du cacao, et de concentration foncière. Les améliorations en cours du modèle concernent une meilleure prise en compte de l'intensification et le développement des systèmes agroforestiers (Piketty et al., 2001).

Tous ces modèles reposent sur des observations de terrain qui servent à les caler et définir des règles de fonctionnement des acteurs entre eux modulées par un certain nombre de contraintes économiques, géographiques, etc... Ils supposent une importante collecte de données (enquêtes) et un recul suffisant sur les régions étudiées. A aucun moment, la contrainte, importante selon nous, de l'imprécision et de l'incertitude liée à ces données n'est explicitement prise en compte. Or, les travaux menés dans d'autres régions du monde (dont les données sont plus nombreuses et a priori plus « fiables ») montrent que, même dans ce contexte, la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision améliore les résultats des simulations. C'est ce que permet de faire la théorie des évidences de Dempster Shafer.

313. Utilisation de la théorie des évidences de Dempster-Shafer

La théorie de Dempster-Shafer, appelée également « Théorie des évidences » (Dempster, 1968 ; Shafer, 1976 ; Srinivasan et Richards, 1990), est généralement appliquée pour fusionner des données de différentes sources (Eastman, 1997), incluant des images de télédétection pour certaines applications. Ainsi, elle est fréquemment utilisée pour mettre en évidence des changements d'occupation et d'utilisation des sols à partir d'images satellitaires issues de différents capteurs, les objectifs poursuivis étant alors l'amélioration des classifications à une date donnée, la détection de changements entre deux ou plusieurs dates, ou encore la résolution du changement d'échelles entre données de différentes résolutions spatiales (Leduc et al., 2001 ; Le Hégarat-Masclé et al., 2000 ; Le Hégarat et al., 2003). Hubert-Moy et al. (2001), ont montré que cette

théorie peut être également utilisée pour prédire des états futurs de l'occupation des sols, en fusionnant des images de télédétection avec d'autres types de données élaborées à dire d'expert afin notamment de déterminer l'évolution vraisemblable de la couverture hivernale des sols (Corgne, 2004; Hubert-Moy, 2004).

A l'inverse des modèles de fusion généralement utilisés - les modèles probabilistes bayésiens et les modèles flous-, la théorie des évidences introduit de l'incertitude dans le processus de modélisation, permet l'expression de l'ignorance ou de l'imprécision dans le corpus de connaissances, et établit que le niveau de confiance dans une hypothèse donnée n'est pas nécessairement le complément de sa négation (Eastman, 1997), laissant ainsi la place à l'incertitude et au doute. Cette théorie représente donc un intérêt majeur pour les applications relevant du devenir de territoires où les chercheurs sont confrontés à la notion de raisonnement approximatif. Dans le cadre précis de simulations de l'évolution de la couverture forestière au Mato Grosso, les informations recueillies pour produire les simulations sont à la fois imprécises (par exemple, « les parcelles sont considérées comme forestières lorsqu'elles sont occupées à plus de X % par des essences forestières ») et incertaines (par exemple, « tel colon, après avoir limité son lot cultivé sur tel espace, va probablement défricher cet espace préférentiellement » ou encore « on ne peut absolument pas savoir ce qu'il fera de ce territoire »), qu'elles proviennent du traitement des séries d'images de télédétection, d'enquêtes et de relevés effectués sur le terrain, de statistiques agricoles ou encore d'avis d'experts. En conséquence, les simulations effectuées sur le territoire du Mato Grosso doivent à la fois prendre en compte le niveau d'imprécision et d'incertitude associé aux données et attribuer un niveau d'incertitude aux résultats produits. Cette dernière condition vise à augmenter la crédibilité des documents produits, puisque lorsque le doute apparaît trop élevé sur le devenir d'un espace donné (« l'espace sera défriché » ou « l'espace sera toujours forestier »), il est toujours possible de ne pas prendre de décision sur son affectation à une des deux classes.

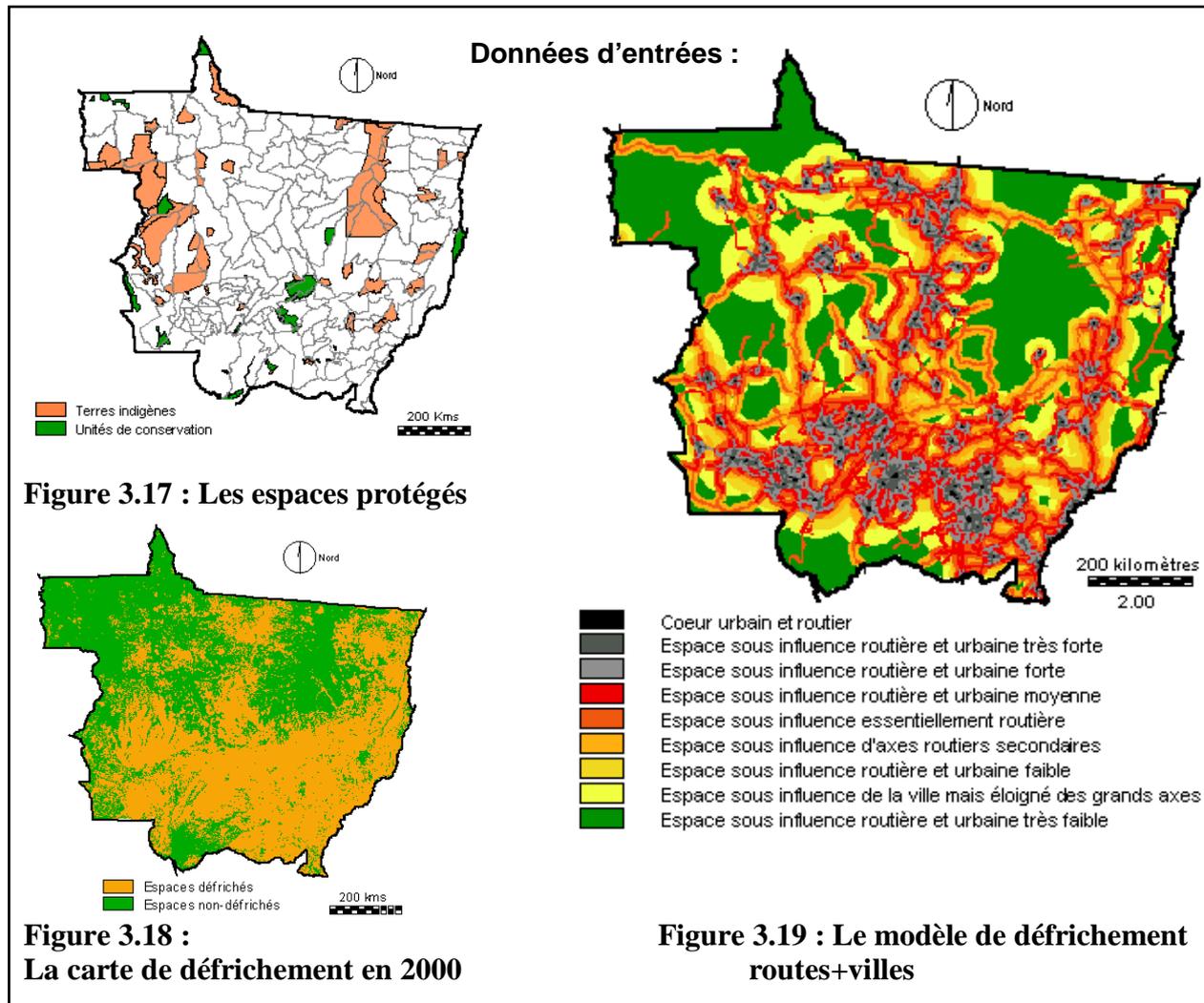
L'idée centrale de la théorie consiste en la décomposition d'une évidence d'un phénomène en diverses composantes. Sur ces dernières, on fixe des coefficients de probabilité qui pourront plus tard être combinés ou étendus. Les objectifs de cette étude sont doubles, ils doivent permettre une spatialisation précise des zones susceptibles d'être défrichées ainsi que la mise en évidence des espaces caractérisés par une forte incertitude quant à l'évolution de la couverture forestière.

La fusion de données, généralement utilisée pour affiner l'information est ici appliquée au Mato Grosso afin de prédire spatialement l'évolution de la déforestation. Deux hypothèses sont ainsi définies : hypothèse « Forêt » et hypothèse « Non-Forêt ». Des cartes affectées d'une fonction de masse de croyance venant soutenir chaque hypothèse sont ensuite réalisées. La règle de fusion de Dempster-Shafer est ensuite appliquée aux différentes cartes fournissant comme résultat une carte de croyance, de plausibilité et d'incertitude pour chaque hypothèse.

Dans notre exemple, trois paramètres d'entrée ont été retenus :

- les différents espaces protégés (réserves indigènes et unités de conservation) au sein du Mato Grosso à la fin de l'année 2000 (figure 3.17);
- les espaces défrichés définis à partir d'une classification d'images satellites NOAA-AVHRR (voir 1^e partie) obtenues en l'an 2000 (figure 3.18);

- un modèle de défrichement réalisé, sur le principe du buffer : il s'agit, dans ce cas, d'une version simplifiée en 9 classes (Nédélec, 2001) de la carte synthétique de risque de déforestation présentée plus haut (figure 3.19).



Des fonctions de masse supportant les hypothèses « Forêt » et « Non-Forêt » sont ensuite affectées aux données d'entrée et intégrées dans la règle de fusion de Dempster-Shafer.

La fusion de l'ensemble des données génère trois types de carte pour chaque hypothèse :

- une image de croyance (belief) qui exprime le maximum de confiance en l'hypothèse et qui correspond à la limite inférieure de la vraisemblance de l'hypothèse.
- une image de plausibilité (plausibility) qui exprime la limite supérieure de la vraisemblance de l'hypothèse (au-delà rien ne prouve que l'hypothèse peut se vérifier).
- une image représentant l'intervalle de croyance (Belief Interval) de l'hypothèse. Elle définit les zones où les doutes et les incertitudes sont les plus importants.

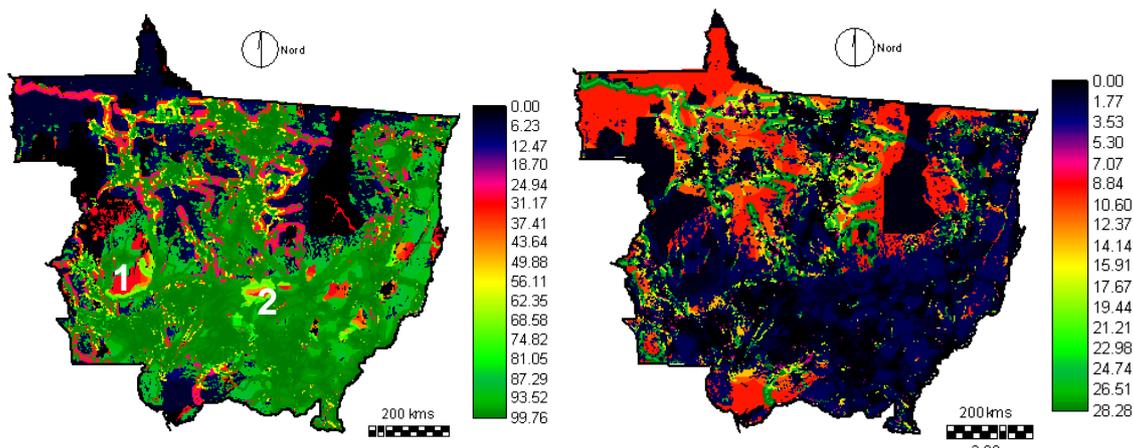


Figure 3.20 : Carte de croyance Non-Forêt **Figure 3.21 : Carte d'incertitude Non-Forêt**

Seuls les résultats concernant l'hypothèse « Non-forêt » sont ici détaillés car ils répondent à la problématique initiale.

- Ainsi sur la carte de croyance (figure 3.20), les valeurs supérieures à 90% révèlent une quasi-certitude de défrichement. Si les résultats semblent exagérés dans le cerrado, ils sont plus pertinents dans la zone forestière (moitié nord). On remarque ainsi l'importance de l'axe Cuiabá-Santarém au centre et des principales villes (Sinop, Alta Floresta, Juina, Juara) dans la dynamique de déforestation. Concernant les espaces protégés, outre le Xingu et les parcs du Nord-ouest où le risque de déboisement est faible (inférieur à 10%), le modèle de fusion met en évidence les pressions anthropiques : que ce soit pour les espaces indigènes (1) ou les unités de conservations (2), les marges sont menacées par l'extension des espaces agricoles. Dans la zone nord-ouest, le rôle d'ouverture joué par les axes de communication est également mis en avant. Dans ces régions encore à majorité forestière, les probabilités de défrichement s'échelonnent ainsi entre 25 et 60% selon l'importance de la route.
- La carte d'incertitude (figure 3.21) met en valeur les espaces où l'évolution du risque de déforestation est mal connue (valeurs >20%). Il s'agit principalement des zones où l'influence de la ville est faible ou sous influence d'axes secondaires.

Ces premiers résultats doivent encore faire l'objet d'une validation à partir des données d'occupation du sol 2002 (travaux en cours dans le cadre de la thèse de V.Nédélec). Par ailleurs, il serait intéressant d'intégrer la temporalité (dynamiques annuelles de défrichement) dans ce type d'approche. Dans tous les cas on voit que les modèles tendent tous à produire des scénarii assez pessimistes en terme de maintien de la forêt et avec des situations socio-économiques qui risquent de rester tendues sur le terrain.

314. Les nécessités de la modélisation pour montrer la faisabilité des systèmes de production durables

Un des arguments majeurs qui milite pour la préservation de la forêt amazonienne est sa biodiversité. L'importance des plantes tropicales pour la médecine est ainsi bien connue puisque près de 25% des médicaments actuels sont obtenus à partir des plantes tropicales. « Sur les 3000 plantes anti-cancérigènes connues, 2100 proviennent de la

forêt tropicale ombrophile » (Pomel & Salomon, 1998). De nombreux modèles montrent que la préservation de cette biodiversité n'est pas totalement incompatible avec la mise en valeur agricole. Les travaux de Metzger (2001) sur les schémas de colonisation en arêtes de poissons du Para montrent que les meilleures configurations spatiales pour la conservation de la forêt sont ceux qui, non seulement, préservent de larges îlots de forêts, mais aussi une forte connectivité entre ces fragments, une faible fragmentation et le maintien d'habitats préservés pendant une longue période dans ces massifs. Bien sur, le maintien d'une réserve légale de 80% de la propriété est le scénario le plus favorable ; cependant, « *legal reserv of 50% is ecologically acceptable only if all the farmers adopt the EDGE or HALF-EDGE patterns of deforestation* », c'est-à-dire une agriculture utilisant toute la largeur du lot de la route vers le fond du lot (EDGE) ou (HALF-EDGE) lorsque l'agriculteur utilise son lot de la route vers le fond du lot mais en n'utilisant que la moitié de la largeur du lot à chaque étape. Ce dernier schéma est un bon compromis entre conservation, régénération de la forêt et l'agriculture. Comparant 2 projets de colonisation en Rondônia (Anari et Machadinho), Batistella et al. (2003) ont montré que le projet mis en place en tenant compte de la topographie et disposant d'une réserve commune présentait des indices de fragmentation plus faibles, aptes à conserver une plus grande diversité d'habitats pour la faune et la flore. De telles expériences ont été menées dans le Mato Grosso, comme nous avons pu le constater sur le terrain en 2002 sur le município de Juruena dans *l'assentamento Vale do Amonhecer* : appuyé par diverses ONG, ce projet a vu l'installation sur 14000 hectares de colons sur des propriétés de 50 hectares. La réserve légale unique et d'un seul tenant était, en 2002, l'objet d'attention de la part des autorités locales. Malheureusement, dès l'année suivante, la découverte d'or dans cette réserve a provoqué un afflux de garimpeiros (y compris des personnes récemment installées sur leur lot de l'assentamento voisin) et le « saccage » d'une partie de la réserve...

D'un point de vue socio-économique, les modèles montrent aussi les limites de la colonisation en petite propriété telle qu'elle est pratiquée en Amazonie. Ainsi, en considérant qu'il faille 0,5 hectare cultivé pour nourrir une personne et avec un cycle de production traditionnel d'agriculture de subsistance sur brûlis sur 10 années (pour simplifier 9 années de jachère, une de culture, l'idéal étant plutôt de l'ordre de 11 années de jachère et une de culture d'après Metzger, 2002), alors il faut au minimum 25 hectares pour nourrir une famille de 5 personnes. En ajoutant la réserve légale cela nécessite une taille minimale des lots de 50 hectares pour une réserve de 50% ou de 125 hectares pour une réserve légale de 80% (Metzger, 2001). Ceci explique les nombreuses critiques formulées contre les projets de colonisation prévoyant des tailles trop modestes aux lots, incapables de subvenir aux besoins de leurs occupants.

L'étude de la déforestation en Amazonie brésilienne montre quelques-uns des intérêts de la modélisation validée par les données de télédétection. La démarche permet de hiérarchiser les facteurs explicatifs des phénomènes observés en proposant une représentation simplifiée de la réalité. Les limites de la colonisation actuelle sont souvent démontrées. On peut aussi mettre en évidence des régions qui risquent d'être prochainement déboisées. La poursuite de l'extension de celles-ci pose alors la question des conséquences climatiques de ce processus de transformation d'utilisation du sol que nous allons maintenant aborder à deux niveaux : à l'échelle régionale de la déforestation mais, tout d'abord, à l'échelle locale de l'urbanisation.

3.2. Mesures des conséquences climatiques de l'urbanisation dans le Nord du Mato Grosso :

La forte croissance de la population urbaine brésilienne s'est accompagnée d'une formidable extension des surfaces urbanisées, ce qui a naturellement conduit les chercheurs brésiliens à développer des recherches en climatologie urbaine. Au Mato Grosso, l'absence d'un réseau de mesures dense, le développement très récent de l'urbanisation et l'éloignement des grands centres de recherches ont contribué à limiter le nombre d'études spécifiques sur les climats urbains. Ce chapitre propose donc de prendre l'exemple des villes de Sinop et Alta Floresta pour illustrer comment le processus accéléré d'urbanisation a engendré en une trentaine d'années une modification profonde des conditions climatiques locales à l'échelle de l'agglomération. Le choix de Sinop et d'Alta Floresta est justifié par la connaissance acquise sur le terrain depuis 1996 (une mission menée chaque année depuis cette date) par l'équipe COSTEL, la disponibilité d'images satellites Landsat acquises régulièrement depuis 1975 (voir 1^e partie) et par le caractère emblématique de ces villes « jeunes », mais déjà peuplées de plus de 100.000 habitants pour Sinop et 40.000 pour Alta Floresta, et dont les fonctions les ont érigé comme les métropoles dominantes de tout le nord du Mato Grosso. La méthodologie retenue pour cette étude de climatologie urbaine est double : comparer des mesures de postes fixes installés en ville et en campagne, d'une part et, d'autre part, la méthode des transects thermiques mobiles réalisés, à Sinop uniquement, en juin 2003 : cette technique de mesure permet en effet de disposer d'un grand nombre d'observations avec un appareillage minimum. Dans le chapitre suivant, nous verrons également comment le processus de déforestation modifie aussi les conditions climatiques à l'échelle locale à partir des mesures réalisées à partir de postes fixes dans la région d'Alta Floresta.

321- Etude des climats urbains au Brésil

Il ne s'agit pas ici de proposer une synthèse exhaustive des nombreux travaux menés dans le monde sur la climatologie urbaine (Oke, 1978 ; Monteiro, 1976 ; Lombardo, 1989 ; Escourrou, 1991 ; Sant'Anna, 2002 ; Cantat, 2004). Notre démarche vise à illustrer, au travers de l'exemple de la climatologie urbaine des villes du *Nortão*, comment le processus d'urbanisation accéléré est, dans cette région, un des facteurs principaux de modifications du climat par l'Homme à l'échelle locale. Nous présenterons donc essentiellement ici les travaux réalisés par les chercheurs brésiliens. Le développement urbain rapide du Brésil, accompagné d'une intense industrialisation, a provoqué de fortes disparités des conditions sociales, économiques et politiques dans les villes. L'absence de prise en considération de la nécessité d'aménagement a contribué à créer des environnements urbains chaotiques, le facteur climatique (chaleur accrue, pollution de l'air,...) n'étant qu'un des symptômes du dysfonctionnement urbain. Ainsi, ces problèmes liés à la croissance urbaine (transports, pollution, ségrégation sociale, etc...) ont entraîné un intérêt croissant des géographes et des climatologues pour ces environnements particuliers. La complexité des processus physiques en ville et l'aggravation de la chute de la qualité de la vie urbaine, notamment dans les grandes villes et dans les zones métropolitaines, ont conduit les climatologues urbains à perfectionner leurs études et conduit la climatologie vers une interaction directe avec les urbanistes, en intégrant le climat à l'aménagement urbain (Monteiro, 1992 ; Mendonça,

1998). Les travaux privilégient trois domaines d'études, à la fois différents et intrinsèquement associés les uns aux autres:

- Le domaine thermo-hygrométrique, dans lequel sont mis en évidence les îlots de chaleur et de fraîcheur urbaine, le confort et l'inconfort thermique, les inversions thermiques etc. En domaine tropical continental, l'îlot de chaleur urbain est, en moyenne, généralement plus marqué en saison sèche : à Cuiabá, la différence moyenne est de 3°C entre le centre ville et la campagne en juillet contre seulement 1°C en saison des pluies (Maitelli, 1994). Ce phénomène est surtout dû à l'augmentation du flux de chaleur sensible en zone urbaine tandis que le maintien d'un flux de chaleur latente plus important en domaine rural limite le réchauffement des basses couches de l'atmosphère.

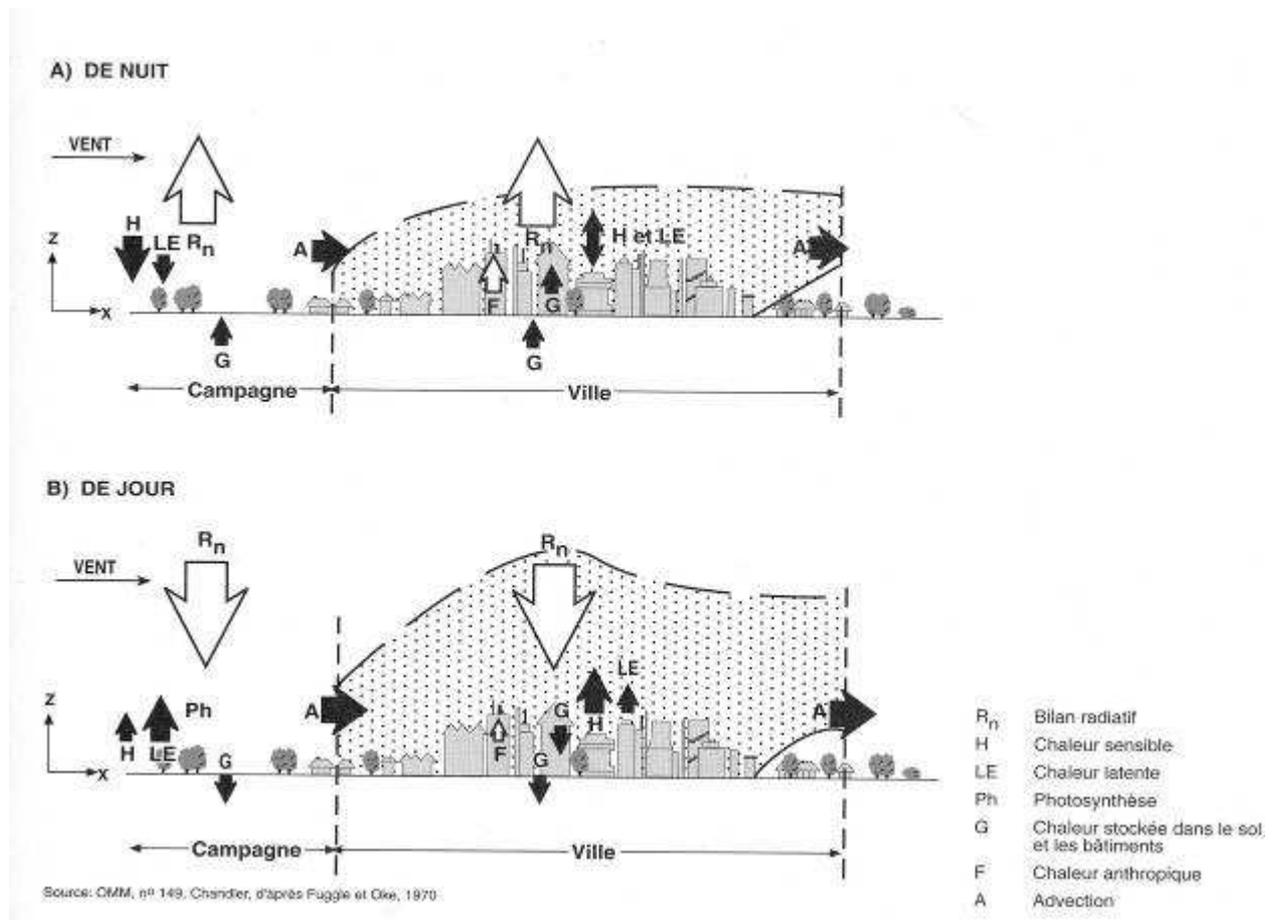


Figure 3.22 : Les échanges radiatifs en ville et à la campagne (source : Hufty, in Dubreuil & Marchand, 1997)

- Le domaine physico-chimique ou dispersion, tourné vers l'analyse de la dynamique de l'air dans son interaction avec la ville, met en relief la pollution de l'air, l'occurrence de pluies acides, la relation entre le vent et la structure urbaine etc. L'augmentation de la rugosité en ville a pour conséquence une réduction de la vitesse moyenne du vent de 10 à 30% (mais localement des effets de canalisation et d'accélération des flux sont observés) : les faibles vitesses du vent et la forte concentration en gaz et particules sont à l'origine des épisodes d'intense pollution urbaine fréquents à São-Paulo.

- Le domaine hydrométéorique, en relation avec l'étude des précipitations urbaines et de leurs impacts, tels que les phénomènes des inondations dans les villes. La plupart des études menées au Brésil montrent que les précipitations intra-urbaines sont de 5 à 10% supérieures à celles des zones rurales environnantes tandis que les valeurs de l'humidité relative sont inférieures d'environ 6% (Tarifa, 1977 ; Mendonça, 1995). A Manaus, l'humidité relative dans la ville est inférieure de 5 à 9% à celle des pâturages alentours la nuit ; en milieu de journée, l'humidité relative est identique en ville et dans les pâturages tandis que l'humidité relative en forêt est supérieure de 3 à 6% (Maitelli & Wright, 1996).

Parmi ces trois champs d'étude du climat urbain préconisé par Monteiro (1976), le domaine thermodynamique est le plus fréquemment étudié. Dans ce champ, est mis en relief la similarité avec les pays développés, dans lesquels on observe aussi une plus grande préoccupation pour les conditions thermiques et hygrothermiques de la ville. Dans les villes de ces pays là, les études ont montré l'importance de la formation d'îlots de chaleur nocturne, phénomène qui diminue le froid en hiver et produit par conséquent une relative sensation de confort thermique. Dans les villes des pays tropicaux ces études visent à proposer des solutions pour limiter les îlots de chaleur et rechercher des sources de fraîcheur: en effet, les fortes chaleurs de l'après-midi et de la nuit dans les villes tropicales génèrent un inconfort considérable et une aggravation d'innombrables troubles (Besancenot, 1995).

Ces fortes chaleurs ne peuvent que s'accroître avec l'extension de l'agglomération. Ainsi, à Cuiabá, la température moyenne observée à 20 heures locales a augmenté d'environ 1°C. de 1970 à 1990 (Maitelli, 1994) : cette augmentation est directement liée à la croissance de l'agglomération de la capitale du Mato Grosso dont la population est passée de 109000 habitants en 1970 à plus de 400000 en 1990. La moyenne des températures minimales (généralement observées en fin de nuit) a également augmenté en moyenne de 1° sur la période 1920 – 1990 tandis que les températures maximales ne montrent pas d'évolution significative. De manière générale, Sansigolo et al. (1990) ont trouvé une augmentation moyenne annuelle de la température comprise entre 0,01°C. et 0,04°C. (avec des valeurs statistiquement significatives à 95%) pour l'ensemble des grandes villes brésiliennes.

La ville de Londrina, dont la population est passée de 19000 en 1940 à plus de 350000 en 1991, est également représentative des cités brésiliennes à la croissance extrêmement rapide. Les travaux de Bobroff (1994) à partir d'images Landsat et de cartes anciennes ont permis de mesurer l'augmentation de la zone urbanisée : alors que la ville ne couvrait que 8,3 km² en 1957, les surfaces urbaines occupaient 34,6 km² en 1970, 58 km² en 1980 et 109 km² en 1993 ! Les observations pluviométriques et surtout thermiques de 1961 à 1991 sont affectées par cette extension urbaine, les températures minimales ayant augmenté d'environ 2°C sur l'ensemble de la période. Les campagnes de mesures réalisées sur le terrain en 1993 (méthode des transects en plus de 17 points de mesures fixes) ont montré que la différence de température ville-campagne pouvait atteindre 10°C (Mendonça, 1995). **Mais, si de telles études sont nombreuses dans les pays développés ainsi que dans le sud du Brésil, il existe encore peu de travaux similaires pour les villes récentes du Nord et du Centre Ouest Brésilien. En outre, dans les études menées dans le sud du Brésil (comme en Europe) la croissance urbaine se produit dans des régions déjà rurales alors qu'au Mato Grosso cette expansion urbaine est concomitante avec la mise en valeur de la zone rurale et la déforestation.**

322- Contexte climatique et quantification de l'îlot de chaleur urbain :

Comme beaucoup de régions nouvellement mises en valeur par l'homme, le Mato Grosso ne dispose pas encore de véritable réseau d'observation météorologique. Au même titre que les océans ou les hautes latitudes, le massif forestier Amazonien est encore relativement mal connu sur le plan climatologique étant donné le faible nombre de stations de mesures. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du nord du Mato Grosso où l'implantation humaine sédentaire et permanente est très récente en liaison avec le processus de colonisation agricole. Il n'est donc pas possible dans l'état actuel du réseau (une dizaine de postes au total pour le réseau de l'INMET) de proposer une carte climatologique détaillée sans avoir recours aux données de télédétection (voir 2^e partie) à l'échelle régionale et, **à l'échelle locale, la mesure de l'îlot de chaleur urbain des villes du Mato Grosso suppose l'installation d'un réseau de mesure spécifique.**

Pour proposer une quantification de l'îlot de chaleur urbain, il a fallu installer un réseau de mesure adapté, généralement constitué d'un doublon de station DAVIS-WM2, une étant localisée en centre ville, l'autre en campagne en fonction de la disponibilité, de l'accessibilité, de la sécurité et (surtout !) de l'intérêt des sites. En 2005, une troisième station a pu être installée provisoirement pendant une semaine dans un quartier périphérique (Palmeiras) du nord-ouest de Sinop (voir photos 3.2 à 3.5 et figure 3.23).

Pour préciser le contexte climatique de l'étude nous pouvons utiliser les données de la seule station disponible sur une longue période, celle de Vera située à une cinquantaine de kilomètres au sud-est de Sinop. Les coordonnées précises de cette station de l'INMET sont 12°17'07" de latitude sud et 55°17'47" de longitude ouest et elle se situe à une altitude de 370m. Il est important de préciser que le contexte géographique est très homogène du point de vue topographique et biogéographique entre les deux villes : il s'agit d'une région située entre la marge nord du plateau du Mato Grosso (plateau de Parecís) et le sud de la dépression Amazonienne et où la végétation naturelle dominante est la forêt de transition (mésophile) qui est peu à peu détruite par l'exploitation du bois, l'agriculture et l'implantation urbaine. Le climat de la région est du type tropical chaud et humide avec deux saisons bien définies: une sèche (de mai à septembre) et une autre pluvieuse (Maitelli et Dourado in Dubreuil, 2002). La pluviométrie annuelle moyenne est de 2060 mm, la température moyenne annuelle est de 24.2°C, la moyenne des températures maximales observées est de 31.6°C (comprises entre 30,7°C en janvier et 33,7°C en août) et celle des températures minimales de 18.6°C (comprises entre 15,5°C en juillet et 21,2°C en décembre). Pour la région d'Alta Floresta (à peine plus chaude et surtout plus arrosée), les données moyennes ont été présentées dans la deuxième partie.



Photos 3.2 : Station « campagne » d'Alta Floresta installée dans un pâturage à 5 kilomètres à l'est de la ville (NDVi², juin 2003)



Photo 3.3 : Station « campagne » de Sinop installée dans le centre expérimental de l'EMPAER à 15 kilomètres au sud de la ville (V.Dubreuil, juin 2005)



Photo 3.4 : Station « périphérie » de Sinop installée dans le quartier Palmeiras : dégagée vers le nord, la station est à l'ombre aux premières et aux dernières heures de la journée (V.Dubreuil, juin 2005)

Photo 3.5 : Station « centre ville » de Sinop installée dans la cour des bureaux de l'EMPAER. La forte luminosité vers midi nécessite parfois le recours à des moyens de fortune pour visualiser les données sur l'ordinateur ! (Photo : H.Potier, juin 2005)



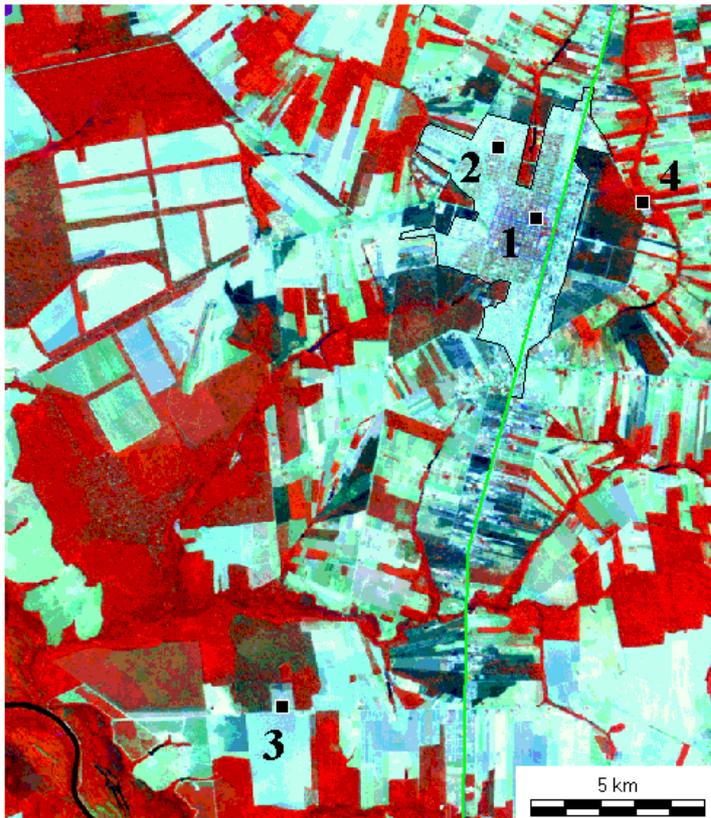


Figure 3.23 : Localisation des stations météorologiques installées à Sinop en 2004-2005 :

- 1 Centre ville, bureaux de l'EMPAER (limite de l'aire urbaine 1999 indiquée par un trait noir ; BR-163 en vert)
- 2 Périphérie, quartier de Palmeiras
- 3 Campagne, centre expérimental de l'EMPAER : les forêts présentes en 1999 au nord et au sud-est n'existaient plus en 2004-2005 !
- 4 Station installée en mars 2004 au milieu d'une clairière mais abandonnée suite à un problème de batterie et à la coupe de la forêt 2 jours après l'installation de la station...

Fond d'image : scène Landsat-7 du 19 août 1999 (CC 4,5,3)

Les relevés réalisés dans la ville d'Alta Floresta en 2003 permettent d'observer l'évolution au cours de la journée de la différence de température entre la ville et la campagne. Bien que calculées sur des nombres de jours différents, les moyennes pour les mois de juin, août, septembre et octobre donnent des indications sur la manière dont évolue ce gradient au cours de l'année. En début de saison sèche (juin), l'écart entre la ville et la campagne paraît négligeable au niveau des moyennes des minima et des maxima (figure 3.24). Cependant, les moyennes horaires montrent que les températures sont plus élevées la nuit (surtout au début avec plus d'un degré d'écart entre 23 heures et 3 heures UTC soit 19 et 23 heures locales) ; l'écart atteint même une fois 2 degrés au cours de ce mois. En journée, l'écart est plus faible et même légèrement favorable à la campagne : les sols souvent à nu et l'aspect grillé et desséché des pâturages dès cette période peuvent contribuer à expliquer cet aspect des choses. A la fin de la saison sèche (figure 3.25), la tendance se confirme avec des écarts légèrement plus faibles (0,3°C pour les minima et à peine 2 degrés pour l'écart maximum absolu) : la proportion très faible de végétation en campagne comme en ville limite la différence entre les deux. Seule la nuit reste légèrement plus chaude en ville. Remarquons que l'écart de température négatif entre la ville et la campagne se situe toujours (comme pour les deux mois suivants) aux mêmes heures, soit 13 heures et 22 heures UTC : dans ce cas, il s'agit en fait d'un effet de masque (ombre d'arbre et de bâtiments) sur la station urbaine, où un site complètement dégagé lors des heures où le soleil est bas sur l'horizon n'a pu être trouvé.

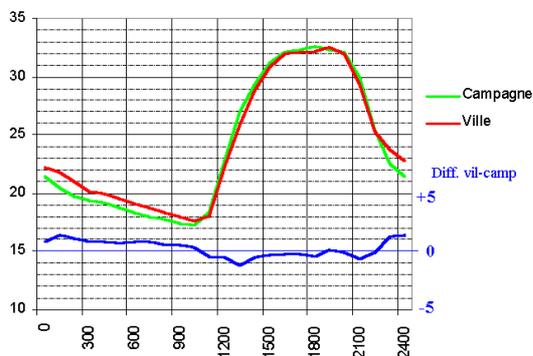
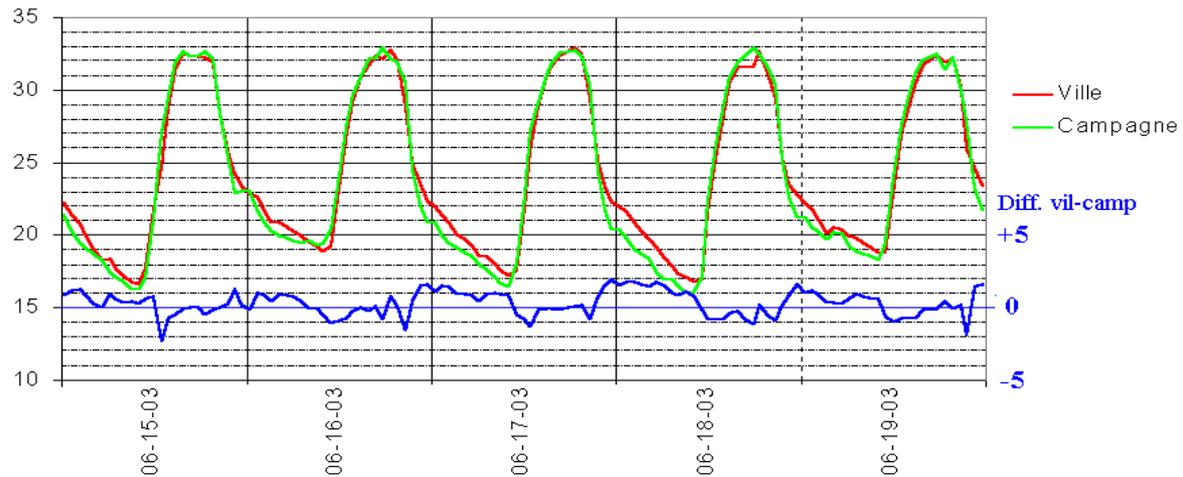


Figure 3.24 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 15/06/2003 au 19/06/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
Ville	17,6	32,8	16,6	33,0	3,7	72	--
Camp	17,6	32,9	16,4	33,1	--	68	0

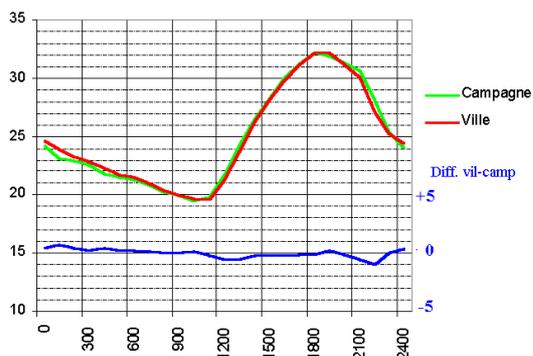
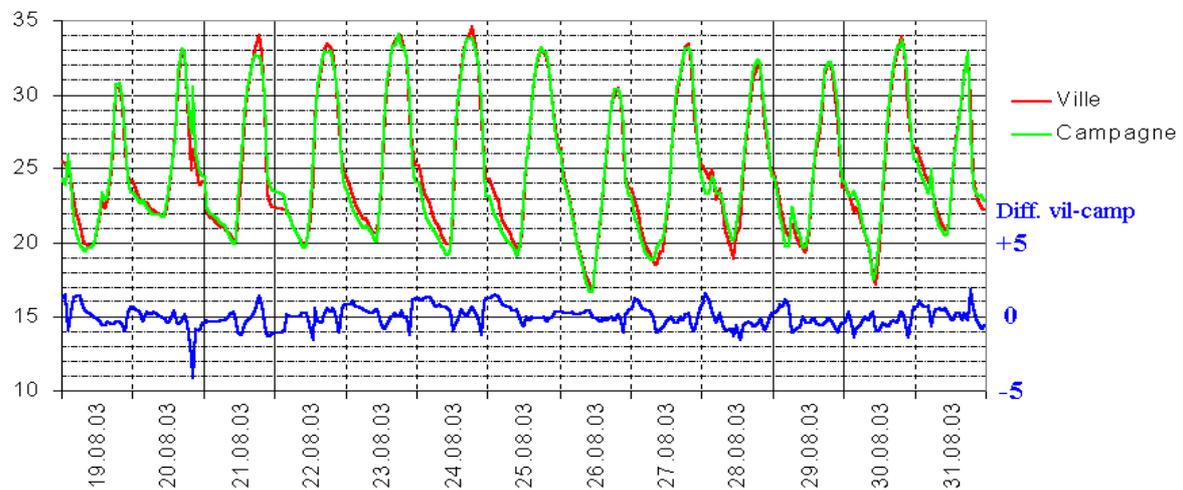


Figure 3.25 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 19/08/2003 au 31/08/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
Ville	20,2	32,8	18,2	34,5	4,5	66	--
Camp	19,9	32,8	17,8	34,8	5,2	66	6,4

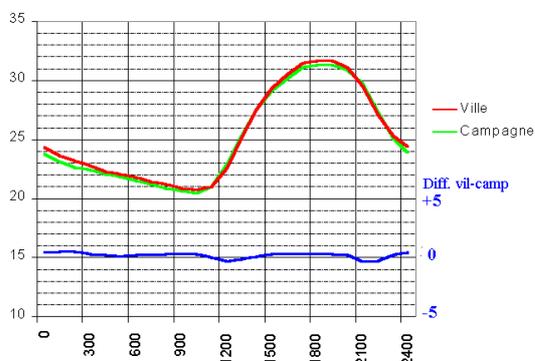
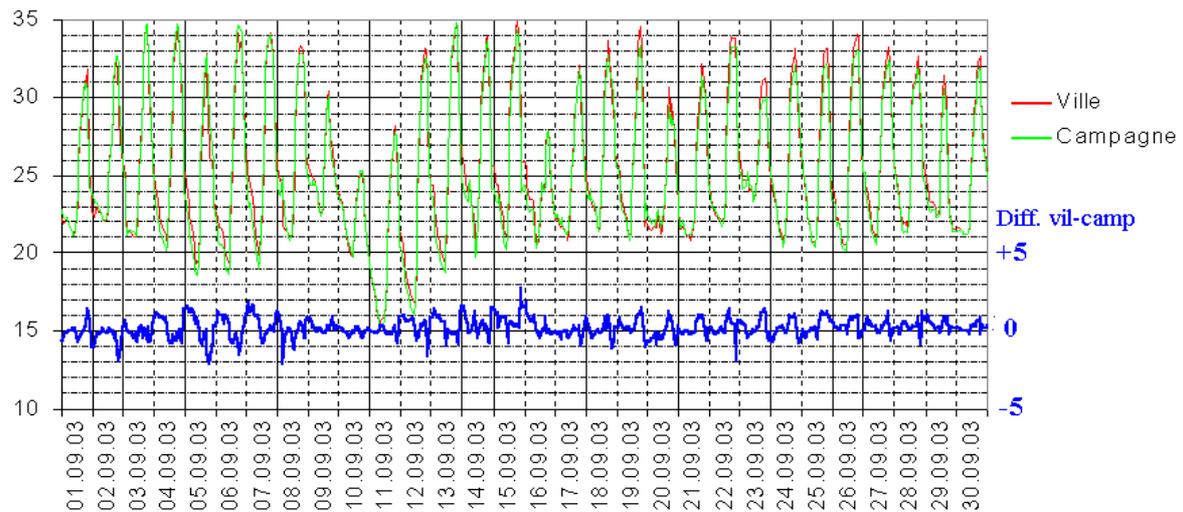


Figure 3.26 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/09/2003 au 30/09/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
Ville	21,0	32,5	15,3	32,5	4,7	78	--
Camp	20,6	32,1	15,1	35,1	2,4	77	120

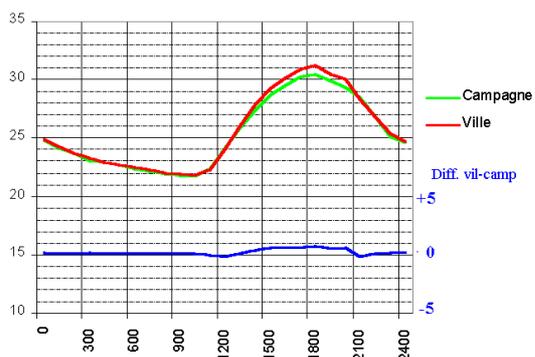
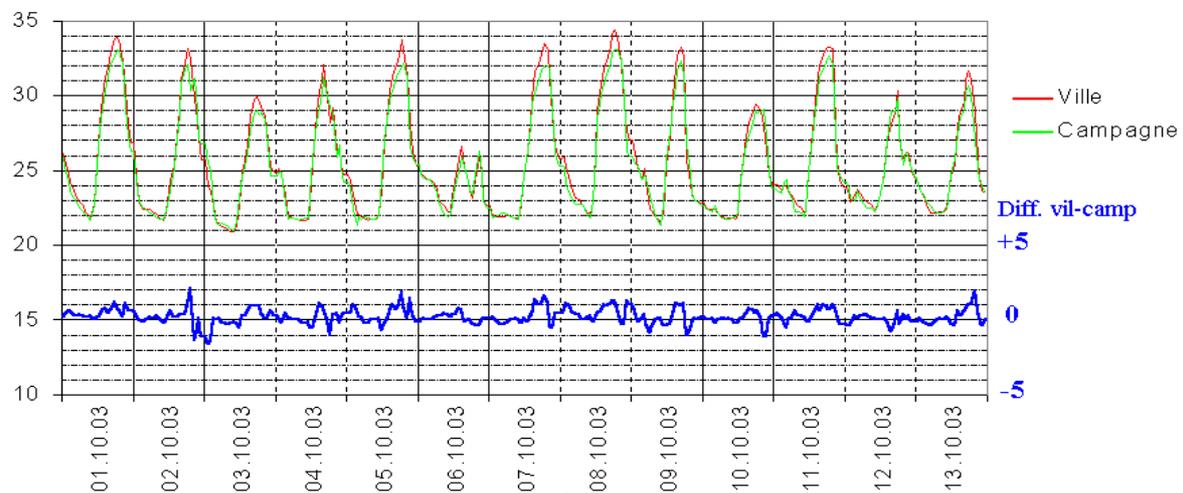


Figure 3.27 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/10/2003 au 13/10/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
Ville	22,0	32,2	20,9	34,6	4,5	82	--
Camp	21,9	31,2	21,2	33,2	6,4	81	91

A partir du mois de septembre (figure 3.26), qui marque la fin de la saison sèche, les températures sont plus élevées en ville de jour (écart moyen de $0,3^{\circ}\text{C}$ vers 18h UTC) comme de nuit ($0,6^{\circ}\text{C}$ vers 1h UTC). Les moyennes des minima comme des maxima montrent une supériorité des températures en ville de l'ordre de $0,4^{\circ}\text{C}$. Une seule journée, en tout début de mois, marque encore une nette différence diurne en faveur de la campagne. La reprise des précipitations dans la deuxième semaine de septembre (120mm pour l'ensemble du mois) entraîne le départ rapide de la végétation qui limite le flux de chaleur sensible au profit du flux de chaleur latente dans la zone rurale : la ville s'échauffe alors plus fortement en cours de journée. Ceci se confirme dans la première quinzaine d'octobre (figure 3.27) où l'écart de température ville-campagne devient surtout un fait diurne : en effet, si l'écart pendant la nuit reste sensible ($0,3^{\circ}\text{C}$ environ), il est désormais plus faible que celui enregistré pendant la journée : $0,8^{\circ}\text{C}$ vers 18h, un degré pour la moyenne des maxima avec trois « pointes » à plus de 2°C .

Loin de répondre à une logique simple de plus fortes températures en ville, les relevés réalisés dans une ville modeste comme Alta Floresta montrent que l'écart de température entre la zone urbaine et les pâturages environnant connaît des fluctuations temporelles fonction des cycles diurnes et annuels : l'impact du cycle végétatif de la végétation environnante est sensible en fonction de la période de l'année (saison sèche / saison humide). Les conditions locales du bilan radiatif dépendant de l'occupation du sol influent donc de manière significative mais non uniforme sur les températures observées et nécessitent de nouvelles campagnes de mesures plus étendues sur l'année pour confirmer les observations faites ici.

Afin de préciser la manière dont l'îlot de chaleur se développe dans le temps et dans l'espace, il faut disposer de davantage de stations : l'exemple des relevés d'avril 2005 à Sinop (figure 3.28 et 3.29), ville plus étendue et au bâti plus dense, avec une station dans un quartier périurbain, va nous permettre d'affiner l'analyse.

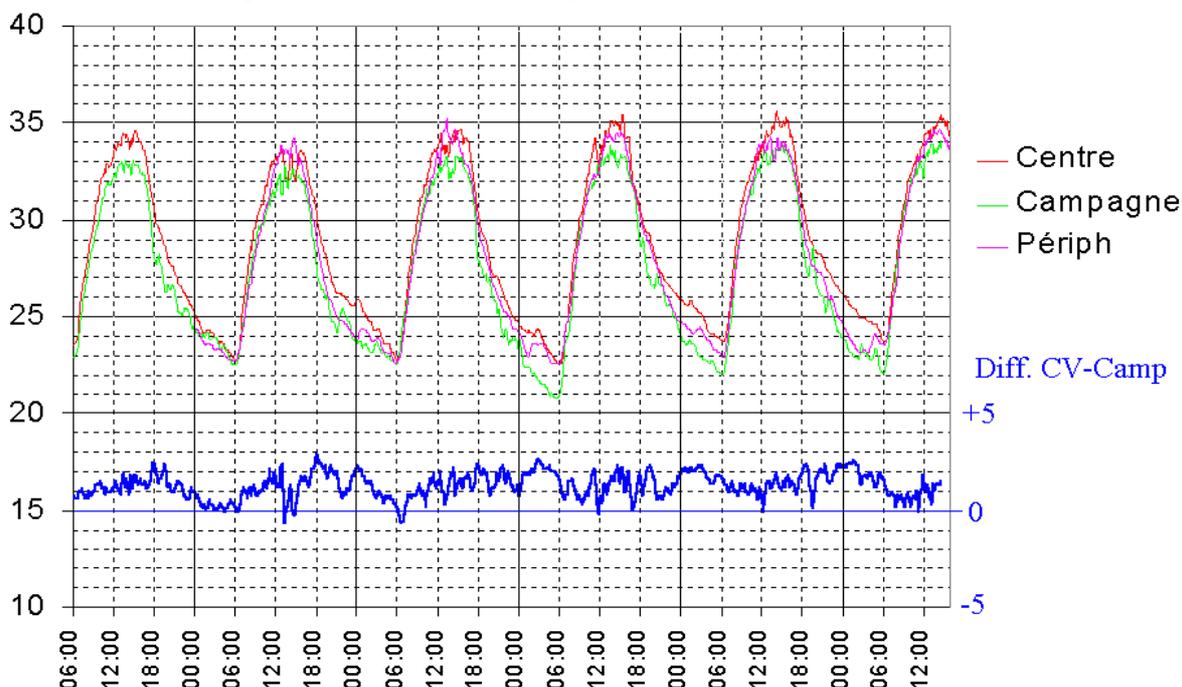


Figure 3.28 : Relevés thermiques à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005 [attention, graphique en heures locales !]

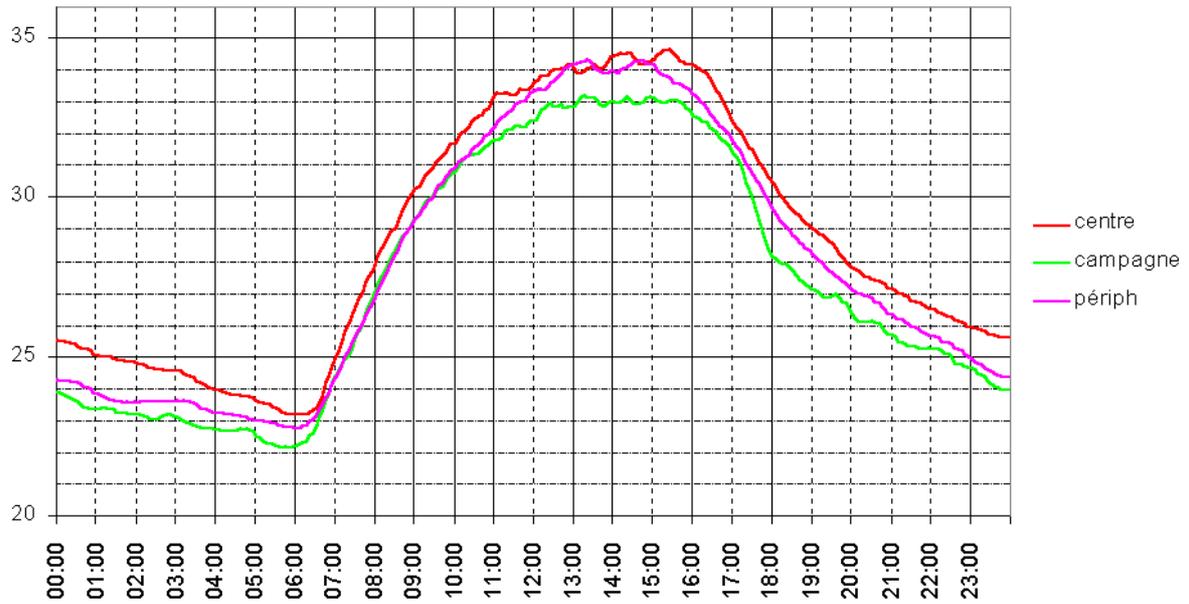


Figure 3.29 : Relevés thermiques moyens à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005 [attention, graphique en heures locales !]

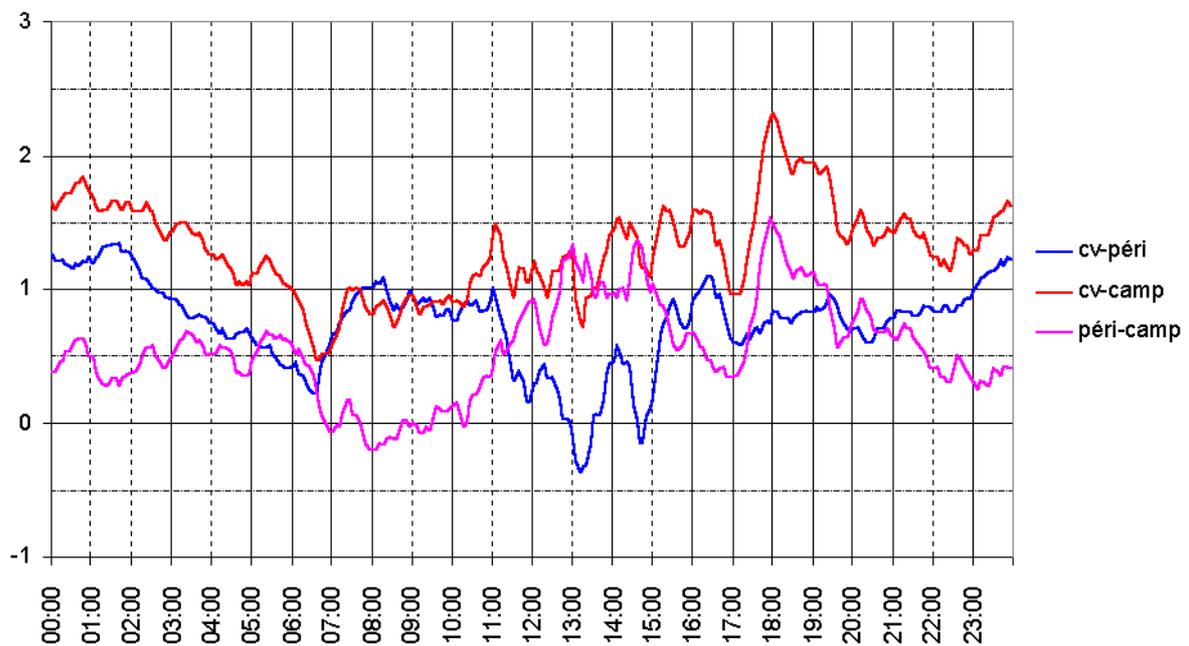


Figure 3.30 : Ecart thermique moyens à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005 [attention, graphique en heures locales !]

Bien que réalisés sur une période plus courte que ceux d'Alta Floresta, les relevés de Sinop montrent un écart moyen plus important en relation avec la taille plus grande de l'agglomération. Précisons également que la zone rurale n'est plus constituée uniquement de pâturages mais, en cette saison, d'une alternance de sols nus (après récolte du soja) et de repousses (de hauteurs très variables) de la deuxième culture de maïs. Les relevés sur 5 minutes laissent, même pour les moyennes, apparaître beaucoup de variabilité dans le détail mais permettent également de mieux comprendre certains aspects. Ainsi, l'écart de température entre le centre ville et la campagne augmente légèrement au cours de la journée (de moins de 1°C vers 7h00 à plus de 1,5° vers 17h00), dépasse 2°C en début de nuit (avec un écart maximum observé de 3°C) se maintient à 1,5°C pendant l'essentiel de la nuit puis décline légèrement en fin de nuit (figure 3.30). On remarque que l'écart baisse sensiblement (un demi degré) en fin de nuit et en fin de journée pendant un peu moins d'une heure, en raison d'un léger effet d'ombre sur la station urbaine. Ces effets d'ombre sont plus marqués pour la station située dans le quartier périphérique de Palmeiras : celui-ci est un quartier d'habitat mixte (bois et brique) avec des lots souvent encore fortement végétalisés (contrairement au centre ville où l'habitat est entièrement en dur et sur 2 ou 3 niveaux). Les relevés diurnes sont peu utilisables du fait de ces effets d'ombres si ce n'est qu'ils montrent un écart d'environ un degré (à peine moins que pour le centre ville) en milieu de journée entre la périphérie et la zone rurale. Les relevés de la nuit sont plus intéressants : l'écart maximum avec la campagne est, comme pour le centre observé vers 18h00 puis il décline pour se maintenir à environ 0,5°C de 22h00 à 6h00. Plus chaud que la campagne, ce quartier est donc également plus frais que le centre. Mais cet écart centre-périphérie évolue au cours de la nuit : d'abord limité à 0,7°C de 18h00 à 22h00, l'écart augmente à 1,2/1,3°C de 23h00 à 2h00 pour diminuer à nouveau régulièrement jusqu'au lever du soleil. Tout se passe donc comme si l'îlot de chaleur urbain bien marqué partout sur la ville en début de nuit (18-22h00) se maintenait plus durablement au centre de la ville, se diluant ou se dissipant progressivement en périphérie, en milieu de nuit (22-2h00) avant de fléchir également (mais en maintenant tout de même un écart significatif avec la campagne) en fin de nuit dans le centre ville. La dimension spatiale limitée de cette approche (3 points de mesure) conduit à tester d'autres méthodologies.

323- Résultats des mesures par transects thermiques mobiles de juin 2003 à Sinop

En effet, le coût des stations météorologiques et la disponibilité de sites appropriés limitent la possibilité d'installation de nombreux points de mesures. Plusieurs auteurs ont donc proposé et réalisé des mesures thermiques itinérantes en installant une sonde dans un abri sur une voiture et en suivant un itinéraire adéquat. Certaines précautions doivent être prises pour ne pas fausser les observations (Lombardo, 1997) : la sonde doit être suffisamment au-dessus de la voiture pour ne pas subir le rayonnement propre du véhicule ; la vitesse de déplacement ne doit pas être trop importante pour permettre à la sonde de mesurer effectivement la température de l'air ambiant (problème de l'inertie des appareils) : pour cette étude nous avons maintenu en permanence une vitesse de l'ordre de 20 km/h et systématiquement réalisé un ou deux tours complets des ronds points (nombreux dans la ville de Sinop !). Enfin, la durée de chaque transect ne doit pas être trop longue pour que les mesures ne soient pas, en fait, le reflet des variations synoptiques ou diurnes de la température. Pour réaliser ces observations nous avons utilisé une station Weather Monitor 2 de Davis Instruments et relevé en continu les températures tout au long du parcours ; pour éviter les effets du rayonnement solaire sur la sonde nous n'avons également effectué les mesures que pendant la nuit, période

qui correspond en général au moment où l'îlot de chaleur urbain est le plus marqué. Cette première campagne visait surtout à mieux préciser un protocole de mesure et devrait être renouvelé par la suite dans le cadre d'une nouvelle collaboration entre le laboratoire COSTEL et le département de géographie de l'UFMT.

Peu d'études ont été tentées au Mato Grosso selon cette méthode dans des villes moyennes : Zamparoni et Lombardo (1997) ont réalisé des travaux en avril et juillet 1993 sur les villes de Tangara da Serra (40000 habitants) et Barra do Bugres (19000 habitants). La différence moyenne observée entre le centre et la périphérie était de 2°C pour Barra do Bugres et 4°C pour Tangara da Serra ; les contrastes étaient alors surtout marqués la nuit, les écarts maxima observés atteignant respectivement 3,6°C et 5,4°C.

Les mesures ont été réalisées à Sinop les 22 et 23 juin 2003 : les températures maximales diurnes ont dépassé les 30°C et il s'agit de journées à vent faible (moins de 2 m/s), à ciel complètement dégagé, ce qui favorise l'augmentation des contrastes climatiques locaux (Carrega, 1992). Tous les transects privilégient l'axe de croissance majeur de l'agglomération (du sud au nord, le long de la BR-163) et traversent les différents secteurs d'urbanisation définis dans la première partie. Les transects des figures 3.31 et 3.33 ont aussi été menés d'est en ouest après un repositionnement plus rapide du véhicule sur le trajet sélectionné. Les durées de mesures des deux premiers transects sont relativement courtes (20 minutes environ) car ils correspondent à des périodes de la journée où les variations temporelles de la température sont importantes (après le coucher du soleil) : ainsi, en moins d'une heure, la température observée au centre ville a baissé d'environ 3°C entre 22 heures et 23 heures. Sur les 7 transects réalisés entre 21 heures et 24 heures, d'une part, et entre 5 heures et 6 heures 30 d'autre part, nous avons donc choisi de ne retenir que ceux qui montraient des températures voisines dans la zone rurale aux deux extrémités pour être sûrs de ne garder que les effets liés à l'urbanisation et pas ceux liés à la variation diurne de la température.

C'est en début de nuit (figure 3.31), que l'écart maximum est observé entre la ville et la périphérie : il dépasse 5°C aussi bien vers le nord que vers le sud ; la présence d'îlots forestiers au sud-ouest et à l'est explique que la température observée vers 22 heures soit même déjà inférieure à 20°C (19,5°C au sud-ouest et 19,7 à l'est). A cette heure, la zone rurale s'est donc déjà considérablement refroidie (de plus de 10°C) alors que le cœur urbain a conservé une température encore élevée : le rayonnement infrarouge des surfaces asphaltées et des volumes d'habitation est alors le plus élevé comparativement aux campagnes voisines. Le gradient thermique est très marqué vers le nord-est (baisse de 4°C en moins d'un kilomètre) et plus faible vers le sud-ouest (baisse de 3°C en 4 kilomètres environ), ce qui peut s'expliquer par la présence d'un léger vent dominant de nord-est, classique en cette saison ; l'îlot de chaleur urbain est alors décalé vers le côté « sous le vent » (Hufty, 1997).

La figure 3.32 montre que, une demi-heure plus tard environ, les températures ont peu varié dans la zone rurale (légère baisse de 1°C au sud-ouest, stabilité au nord) alors que le rafraîchissement nocturne est plus marqué au centre ville. Le contraste est donc moins fort, de l'ordre de 3°C avec la campagne, 4°C si l'on prend en compte la mesure de 18^h55 réalisée en bordure de forêt. Les gradients sont plus faibles et on n'observe plus de rupture aussi nette, comme si on assistait à une dilution de l'îlot de chaleur urbain vers les quartiers périphériques. Les gradients les plus marqués (de l'ordre de 1°C seulement) se retrouvent ainsi à l'extrême sud-ouest et à l'extrême nord.

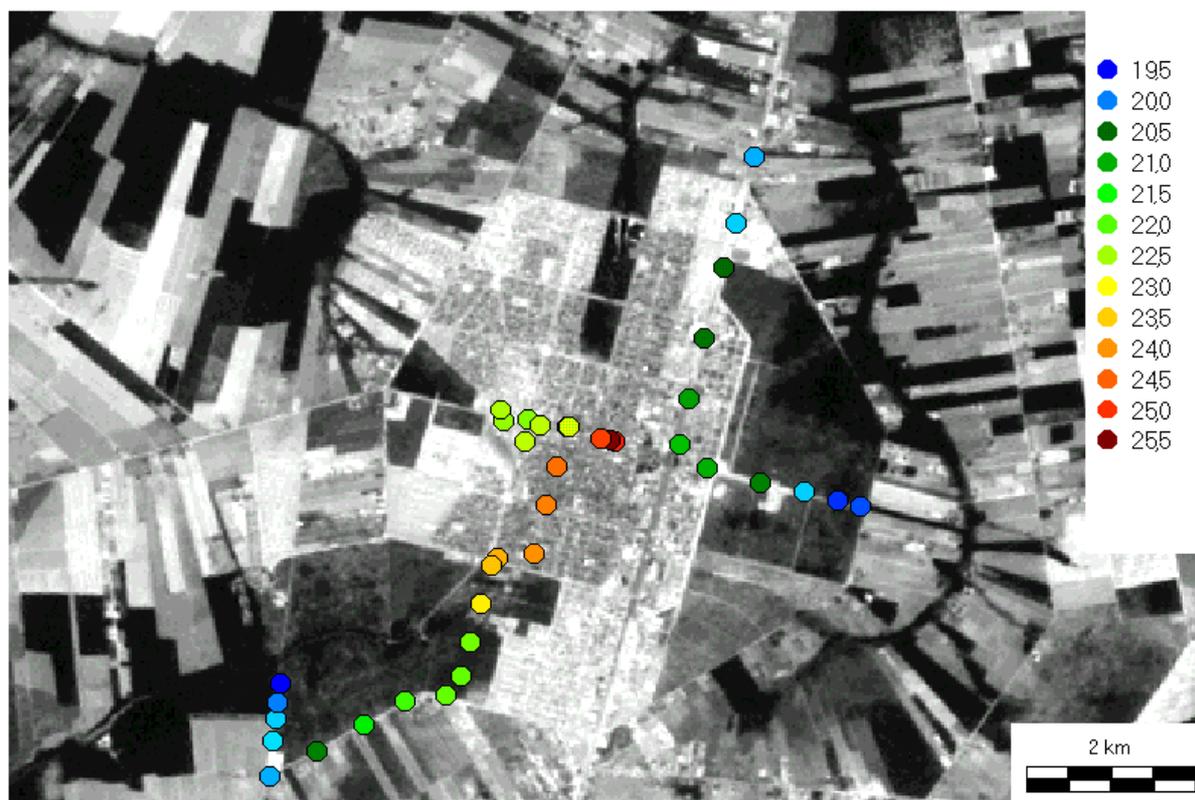


Figure 3.31 : Transect thermique du 22 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 21h53 à 22h12 locales (en fond d'image, le canal 3 de l'image Landsat-7 du 19 août 1999, la forêt apparaît en sombre)

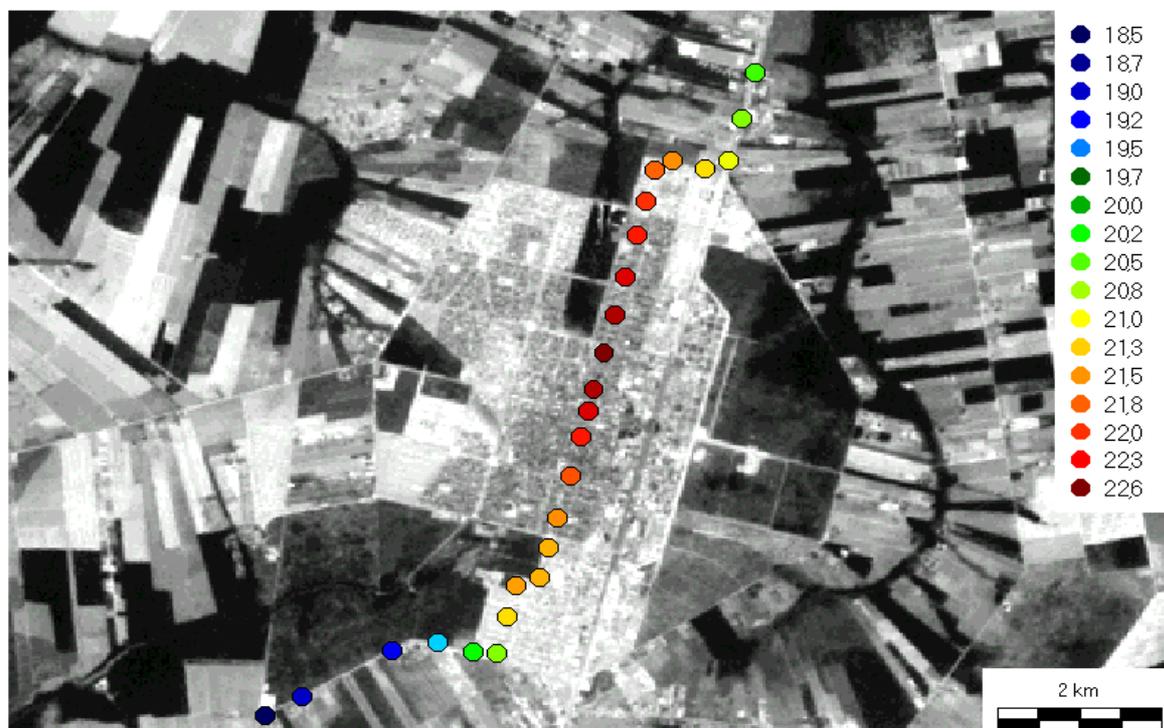


Figure 3.32 : Transect thermique du 22 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 22h22 à 22h47 locales (en fond d'image, le canal 3 de l'image Landsat-7 du 19 août 1999, la forêt apparaît en sombre)

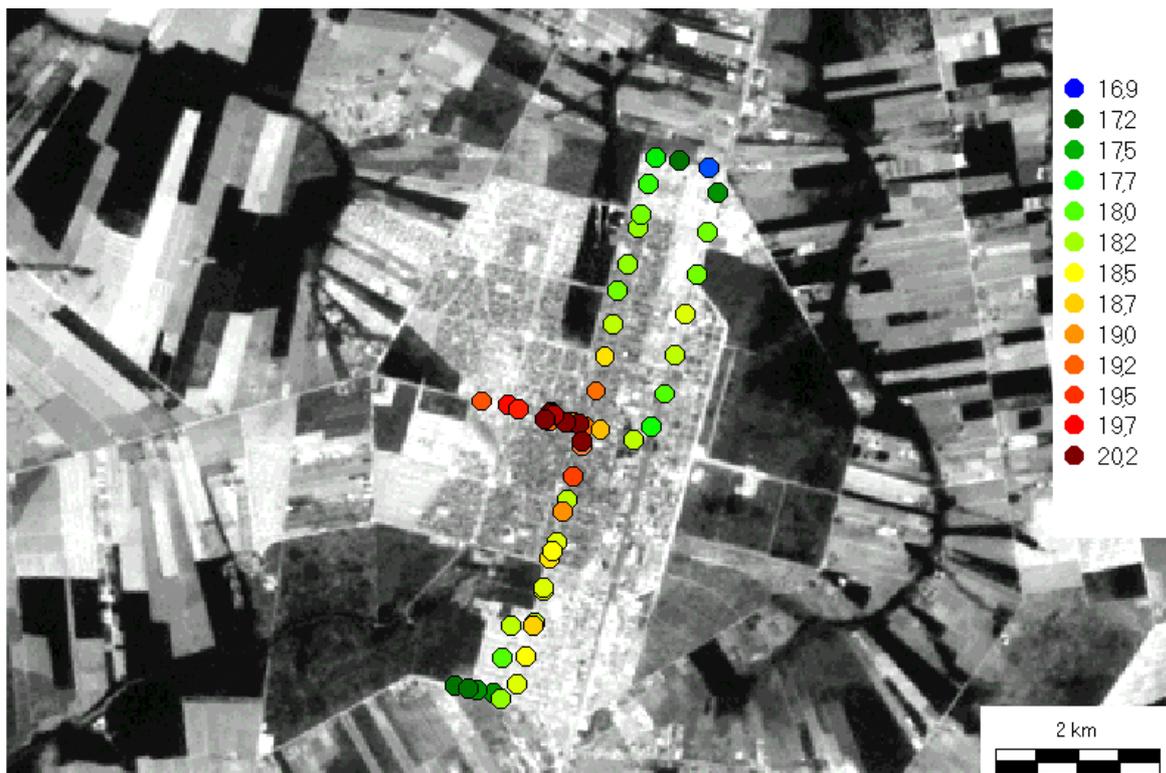


Figure 3.33 : Transect thermique du 23 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 5h19 à 6h15 locales (en fond d'image, le canal 3 de l'image Landsat-7 du 19 août 1999, la forêt apparaît en sombre)

La figure 3.33 représente les résultats des deux transects réalisés le 23 juin au matin avant le lever du soleil. Comme cette période est généralement une période de faible variation temporelle de la température, nous avons étendu la durée de mesure à près d'une heure en effectuant des relevés à une vitesse plus réduite (inférieure à 20 km/h) et en juxtaposant les résultats des deux trajets effectués puisque les relevés aussi bien en ville qu'en campagne y étaient assez proches. L'écart maximum observé entre la ville et la zone rurale est de l'ordre de 3°C. (entre 17 et 20°C. environ) ; pour concentrer les mesures sur l'aire urbaine nous n'avons pas prolongé les mesures jusqu'à la forêt au sud-ouest mais il est probable que des valeurs proches de 16°C. auraient été mesurées dans la mesure où, pour presque tous les autres points, la température de l'air a diminué d'environ 2°C entre 23 heures la veille et 6 heures. On peut remarquer que la température de l'air est très homogène sur toute la surface urbanisée, comprise entre 18 et 19°C. Il faut aller soit à la limite de l'aire urbaine pour observer des températures inférieures à 18°C, soit dans le secteur urbanisé très dense du centre ville pour dépasser (sur une faible étendue spatiale) les 20°C. La situation observée le matin rappelle donc plutôt la situation de début de nuit pour la structure spatiale mais plutôt la situation de 22h30 pour l'amplitude des gradients observés.

Pour mettre en évidence l'intensité, mais aussi pour spatialiser les limites de l'îlot de chaleur urbain, la méthode des transects thermiques mobiles est particulièrement bien appropriée (pour peu qu'elle soit effectuée dans des conditions rigoureuses) dans la mesure où elle permet de multiplier les points d'observation avec un matériel minimum. **Cette première campagne de mesure montre cependant qu'il aurait été intéressant de disposer d'une station fixe pour mieux maîtriser le paramètre de variation thermique liée au**

cycle diurne. Les résultats et la méthode employés sont donc encourageants et appellent de nouvelles campagnes de collectes de données à des heures mais aussi pendant des moments de l'année différents. Pour obtenir des cartes plus détaillées, on pourrait également imaginer une série de 2 véhicules se déplaçant en même temps sur des trajets différents (perpendiculaires par exemple) afin d'affiner encore la cartographie des températures de l'air. Il serait alors possible de montrer, en outre, la présence d'îlots de fraîcheur au cœur de la ville correspondant à des parcs ou à des quartiers à l'urbanisation moins dense, ce qui n'a pu être que timidement observé autour du parc urbain du nord de la ville de Sinop (variations faibles de l'ordre de 0.1 à 0.2°C.). Ainsi, la prise en compte détaillée de l'occupation du sol mais aussi des types et des densités de bâtis (Charabi, 2001) devraient être pris en compte pour mieux comprendre la répartition spatiale des températures au sein de l'agglomération.

Dans le cas des projets de colonisation dont le processus d'urbanisation a pris une grande ampleur, comme c'est le cas pour Sinop, la transformation radicale de l'occupation du sol s'est accompagnée d'une importante modification des conditions locales du bilan de l'énergie et d'une accentuation des contrastes thermiques locaux. **Au total, la différence de température observée actuellement entre le cœur de la ville de Sinop et les campagnes voisines (comprise entre 2 et 5°C.) est donc comparable voire vraisemblablement supérieure aux valeurs moyennes observées dans l'ensemble de la moitié nord du Mato Grosso avant la déforestation et l'urbanisation.** Au-delà des éventuelles implications climatiques globales du mouvement de défrichement observé en Amazonie depuis 30 ans, l'action anthropique a donc déjà produit des transformations radicales du climat à l'échelle locale mais, au-delà des résultats partiels présentés ici, elles restent encore mal connues et peu étudiées.

3.3. Déforestation et climat : théories et mesures à l'échelle locale dans la région d'Alta Floresta

La transformation du paysage et principalement le remplacement de la forêt par des pâturages contribue à modifier sensiblement le bilan radiatif à l'échelle locale (Lyons & Smith, 1996 ; Perrier, 1987). Pour quantifier l'amplitude du changement de nombreux dispositifs expérimentaux ont été implantés en Amazonie, souvent dans le cadre de collaborations internationales comme les programmes ARME (*Amazon Region Micrometeorological Experiment*), ABRACOS (*Anglo-Brazilian Climate Observation Study*, Gash et al., 1996 ; Shuttleworth, 1991) ou plus récemment LBA (*Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), programme conjoint entre l'INPE et la NASA. Les sites instrumentés les plus fournis et couvrant la période la plus longue (et souvent utilisés dans la littérature) sont ceux de Manaus et du Rondônia dans la région de Ji-Parana ; ces sites sont généralement constitués de doublons de tours de mesures en forêt et en pâturage, parfois également dans des secteurs de repousse (*capoeira*). Comme il est illusoire de vouloir saisir la diversité et la complexité des interactions végétation-atmosphère à partir de ce nombre limité de grandes stations expérimentales, des installations plus sommaires ont été installées plus récemment : ainsi dans le Mato Grosso, les sites de Sinop (une des rares installations en forêt de transition, Vourtilis et al., 2002) et Alta Floresta fournissent depuis peu (elles n'ont pas pu être utilisées pour ce travail) des données encore lacunaires. Signalons également que l'intérêt du Brésil, aiguillé par certaines ONG actives, pour le marché des permis d'émission de CO₂ (Richards & Stokes, 2004) et le besoin de certaines multinationales de réaliser des opérations environnementales a conduit à une expérience originale à Cotriguaçu au nord du Mato Grosso (photos 3.6).



Photos 3.6 : Fazenda São Nicolau (ou « fazenda Peugeot » !) à Cotriguaçu, Mato Grosso.

En 1998 Peugeot rachète cette fazenda de 10000 hectares pour installer (en partenariat avec l'ONF-Brasil et l'ONG Pro-Natura) une expérimentation de puits de carbone (Graffin & Assumpção, 2001). Sur les terres défrichées de la fazenda (2500 hectares) un reboisement mixte en espèces régionales (Ipê rose, Castanheira, Caja, Sumauma,...) et commerciales (Teck, Caxeta, Cèdre rose,...) est progressivement réalisé (photo du bas, noter la survivance, problématique, du pâturage entre les arbustes). Pour mesurer la quantité de carbone effectivement fixée et les composantes climatiques, une tour instrumentale a été dressée au milieu de la fazenda.

(Photos NDVi², juin 2002)



331- Bilan radiatif comparé forêt/pâturages

De nombreuses études ont souligné la spécificité du climat de l'Amazonie et notamment de l'importance de l'interaction entre la forêt et le climat (Nimer, 1989). Dans cette région, l'atmosphère fournit une quantité importante d'eau avec des précipitations qui dépassent le plus souvent les 2 mètres en moyenne annuelle. On sait qu'en retour une partie importante des précipitations que reçoit la forêt provient de sa propre évapotranspiration. De cette manière la forêt contribue à maintenir un climat qui lui est favorable. Outre les précipitations, la forêt assure le maintien d'une forte humidité et d'une gamme de températures assez élevées (30 à 34° le jour, 15 à 20° la nuit en moyenne). Toute modification importante du couvert végétal doit donc avoir des conséquences climatiques et hydrologiques (Lean et Warilow, 1989). « *Sous les tropiques, les gradients thermiques horizontaux sont plus faibles qu'ailleurs en raison de la faible amplitude annuelle du forçage solaire. L'atmosphère tropicale est alors plus sensible aux conditions de surface (relief, albédo, température, humidité, végétation* » (Roucou, 1997). Les mesures complètes réalisées dans le Rondônia vont nous permettre de comprendre comment, dans des conditions climatiques assez voisines de la région d'Alta Floresta, vont s'exprimer les différences observées entre la forêt et les pâturages.

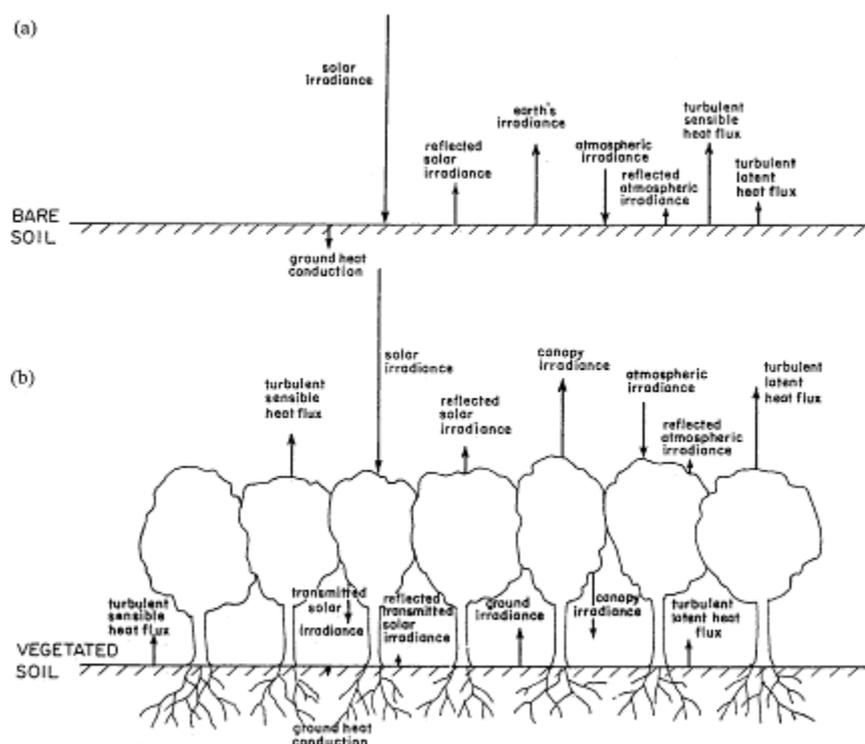


Figure 3.34 : Schéma du bilan de surface au-dessus d'un sol nu (a) et d'une forêt (b).
(Source : Pielke, 2001)

Le bilan radiatif global présente, en effet, des différences sensibles au-dessus des deux types de couvert (figure 3.34). La différence tient d'abord à la différence d'albédo (variant de 0,11 à 0,14 sur la forêt contre 0,18 à 0,22 sur les pâturages) et au rayonnement infrarouge émis par les surfaces qui est également plus élevé sur les pâturages, surtout pendant la journée alors qu'il est proche de celui de la forêt pendant la nuit. La plus grande déperdition infrarouge diurne et le plus fort albédo des pâturages conduisent à un bilan net favorable à la forêt figure 3.35 et tableau 3.1)

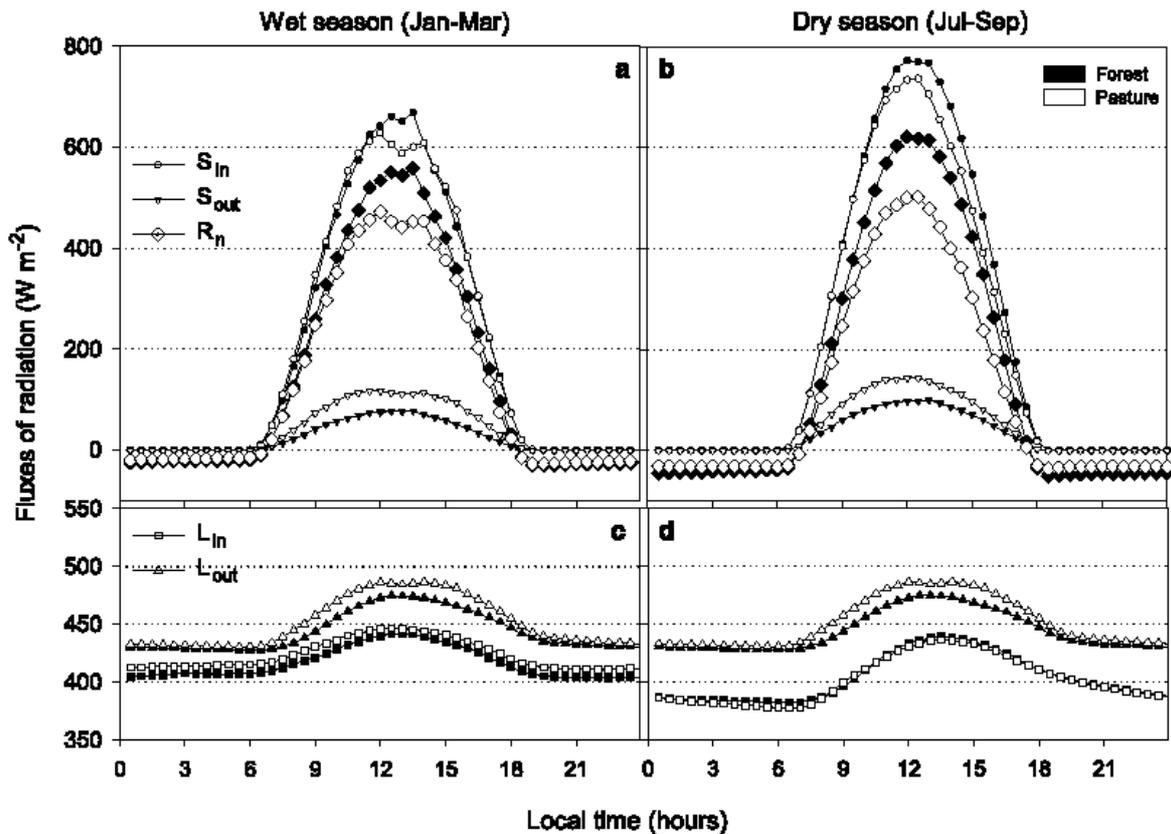


Figure 3.35 : En haut : moyennes journalières de la radiation solaire incidente (S_{in} , cercles), de la radiation réfléchi (S_{out} , triangles inversés) et de la radiation nette (R_n , losanges) pendant la saison humide (a) et sèche (b). En bas : même chose pour la radiation infrarouge incidente (L_{in} , carrés) et émise (L_{out} , triangles) pendant la saison humide (c) et sèche (d). Relevés réalisés de 1999 à 2002 dans la région de Ji-Parana, Rondônia. Source : Von Randow et al., 2004

	S_{in}	S_{out}	L_{in}	L_{out}	R_n	Albedo	L_n
Forest	206.0	26.1	411.6	448.0	143.2	0.13	-36.3
Pasture	202.8	40.6	413.6	451.6	124.2	0.20	-38.0
Land use change effect							
P-F	-3.2	14.5	2.0	3.7	-19.0	0.07	-1.7
(P-F)/F (%)	-1.6	+55.5	+0.5	+0.8	-13.3	+57.9	+4.7

Tableau 3.1 : Synthèse du bilan radiatif moyen sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana. Même légende que la figure précédente. L_n =radiation infrarouge nette (L_{in} - L_{out}). Source : Von Randow et al., 2004

	Wet season				Dry season			
	R_n	H	λE	$\lambda E/R_n$	R_n	H	λE	$\lambda E/R_n$
Forest	136.1	31.6	104.5	0.77	146.9	38.3	108.6	0.74
Pasture	128.6	45.5	83.0	0.64	113.0	49.1	63.9	0.56
Land use change effect								
P-F	-7.5	13.9	-21.5	-0.13	-33.9	10.8	-44.7	-0.18
(P-F)/F (%)	-5.5	+44.2	-20.5	-16.9	-23.1	+28.1	-41.2	-24.3

Tableau 3.2 : Valeurs moyennes des flux de chaleur sensible (H) et latente (λE) sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana. Source : Von Randow et al., 2004

La répartition entre les flux de chaleur sensible et latente est également riche d'enseignement (tableau 3.2). Alors que ces flux varient peu au-dessus de la forêt (le rapport de Bowen, rapport entre le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente, reste compris toute l'année entre 0,3 et 0,4), les valeurs au-dessus des pâturages sont très variables au cours de l'année. Pendant la saison sèche, le flux de chaleur latente diminue fortement sur les pâturages alors qu'en forêt l'enracinement des arbres leur permet de puiser de l'eau dans le sol et continuer à assurer un flux comparable à la saison humide. Le flux de chaleur sensible est toujours nettement plus élevé pour les pâturages, même pendant la saison humide. Au total, le rapport de Bowen des pâturages est marqué par une forte saisonnalité, passant de 0,4 en saison humide à 0,8 en saison sèche. A l'échelle locale, l'augmentation de la part du flux de chaleur sensible au détriment du flux de chaleur latente doit se traduire par une augmentation des températures maximales observées sous abri en région défrichée.

Pendant la saison sèche, l'intensité du flux de chaleur sensible sur les pâturages a pour conséquence d'épaissir la couche limite convective (CBL *Convective Boundary Layer*) d'environ 500 mètres supplémentaires par rapport à la forêt (Fisch et al., 2004). Les mesures effectuées par radiosondage dans le Rondônia montrent que la CBL atteint 1650m au-dessus des pâturages contre 1100m au-dessus de la forêt durant cette saison à 17h00 locales. Elle est en outre plus chaude et plus sèche au-dessus des pâturages. En revanche, durant la saison pluvieuse, la CBL a à peu près la même épaisseur : 1100m sur les pâturages et 1000m sur la forêt. Loin de rester confinée dans les basses couches, le changement de surface a donc des répercussions sur différents niveaux de l'atmosphère.

332- Ecart thermique entre forêt et pâturages dans la région d'Alta Floresta

Pour préciser maintenant les conséquences climatiques locales de la déforestation, nous allons utiliser les mesures réalisées dans la région d'Alta Floresta à partir de deux stations Davis-WM2 fixes (figure 3.36)

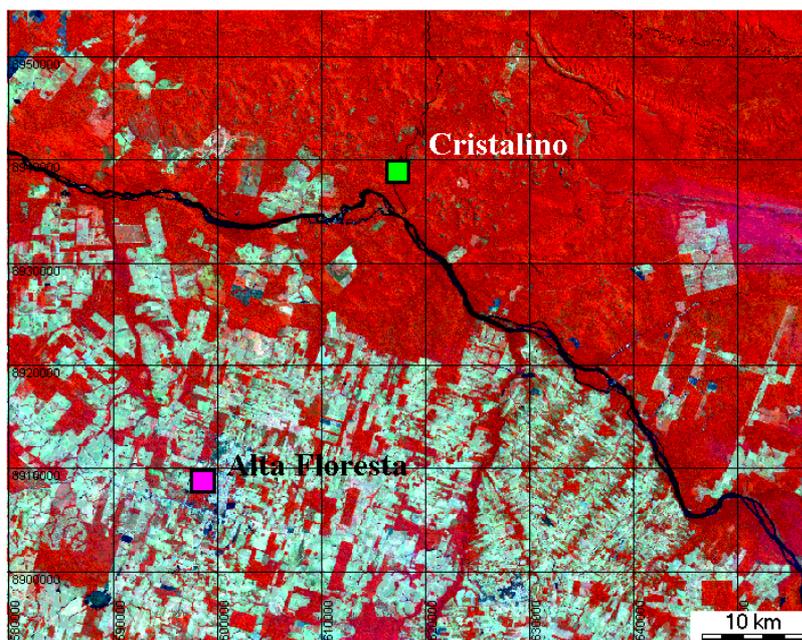


Figure 3.36 :
Localisation des stations météorologiques dans la région d'Alta Floresta.

Vert : au milieu de la forêt, sur la rive droite du fleuve Teles Pires, station installée au Parc du rio Cristalino

Violet : au milieu des pâturages dans une région aux deux-tiers défrichée près de la ville d'Alta Floresta

En fond, image Landsat du 10 août 1999 (CC 4,5,3).



Photo 3.7 : Vue de la station Davis-WM2 installée au Cristalino-Jungle Lodge au nord d'Alta Floresta (NDVi², juin 2003)



Photo 3.8 : Vue vers l'ouest de la forêt environnant le Cristalino-Jungle Lodge (NDVi², juin 2003)



Photo 3.9 : Vue du ponton d'arrivée au Cristalino-Jungle Lodge : l'accès n'est possible qu'après 30 minutes de bateau précédées de 2 heures de pistes (NDVi², juin 2003)

Le plus gênant pour ce type d'étude est l'impossibilité de trouver à proximité d'Alta Floresta (comme de Sinop) des grands massifs forestiers relativement préservés : en effet, rares sont les massifs intacts dans la région (y compris dans les réserves !) qui n'ont pas été au moins partiellement exploités par les bûcherons notamment pour extraire les essences précieuses, sans parler des espaces purement et simplement déboisés. A cela s'ajoute la contrainte, non négligeable sur le terrain, d'accéder à un site intéressant en forêt : clairière pas trop grande dans un massif forestier pas trop petit... Pour toutes ces raisons notre choix s'est porté sur le site de l'hôtel du parc Cristalino (récemment promu parc national après de nombreux litiges avec les éleveurs des fazendas voisines) situé à 36 kilomètres (à vol d'oiseau) de la ville d'Alta Floresta (photos 3.7 à 3.9). Le site est encore largement forestier et son intérêt a aussi retenu l'attention des membres du projet LBA qui y ont récemment installé une tour d'observation.

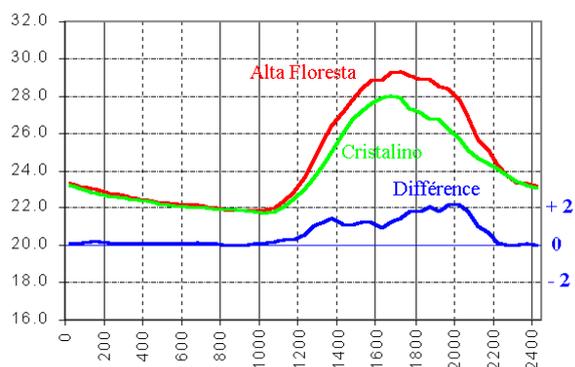
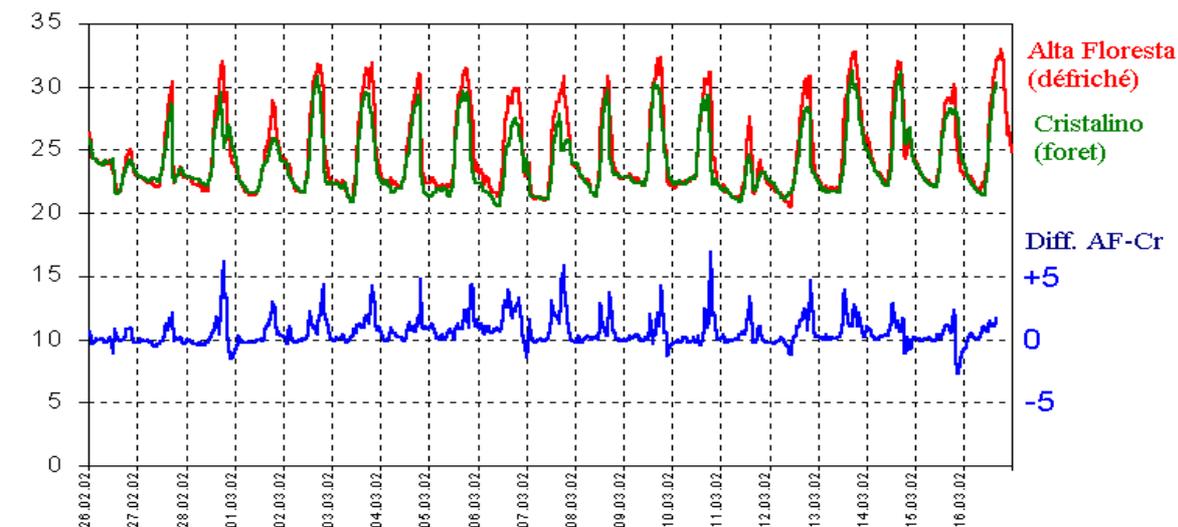


Figure 3.37 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 26/02/2002 au 16/03/2002 dans la région d’Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
AF	21,6	30,9	20,4	33,1	4,7	86	72
Crist	21,4	29,2	20,6	31,3	2,4	88	--

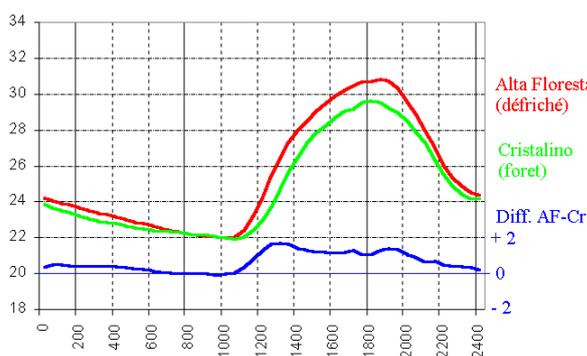
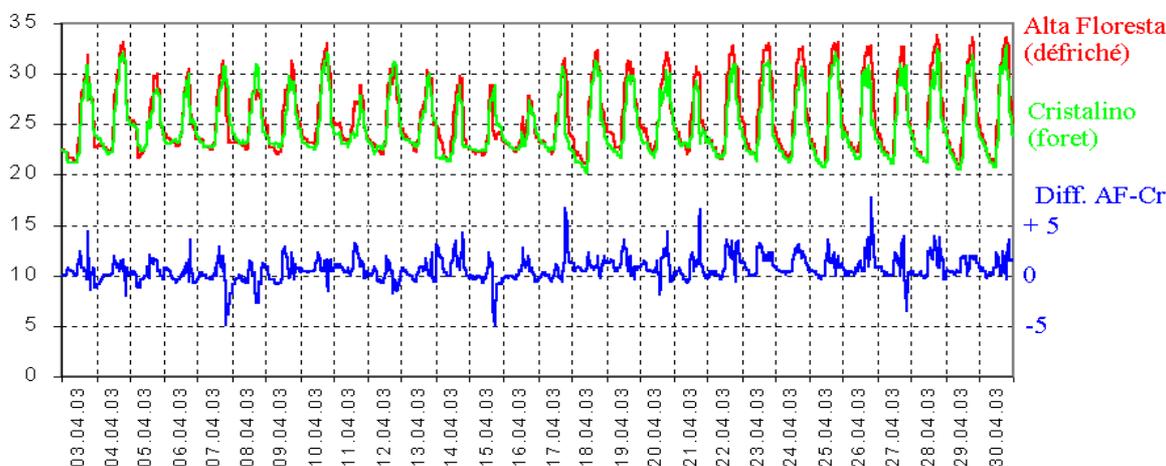


Figure 3.38 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 03/04/2003 au 30/04/2003 dans la région d’Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
AF	21,9	31,8	20,7	33,9	3,7	86	--
Crist	21,8	30,9	20,2	33,2	1,9	90	210

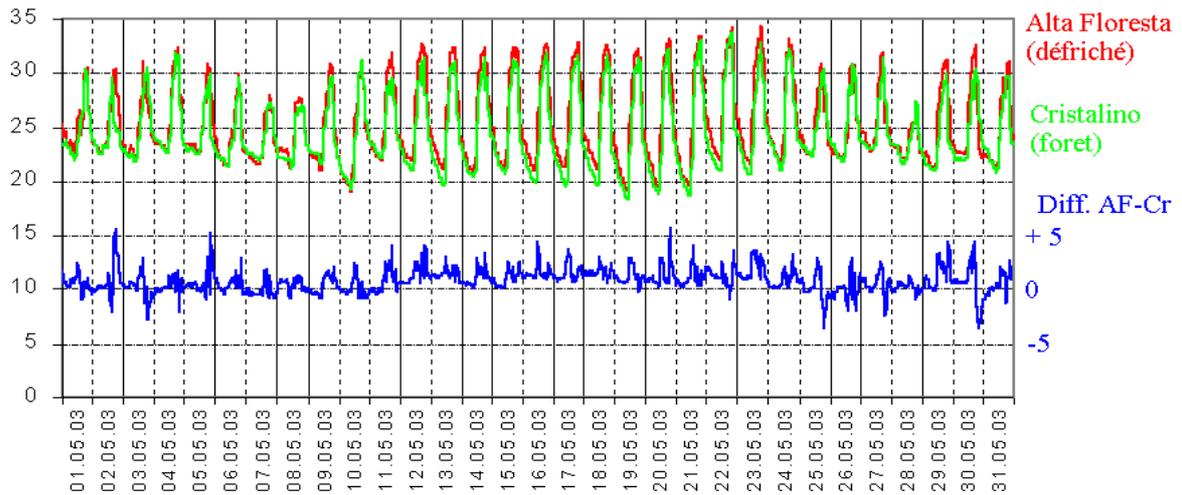


Figure 3.39 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/05/2003 au 31/05/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
AF	21,4	31,8	18,9	34,5	4,0	83	--
Crist	20,9	31,0	18,4	33,7	2,3	89	94

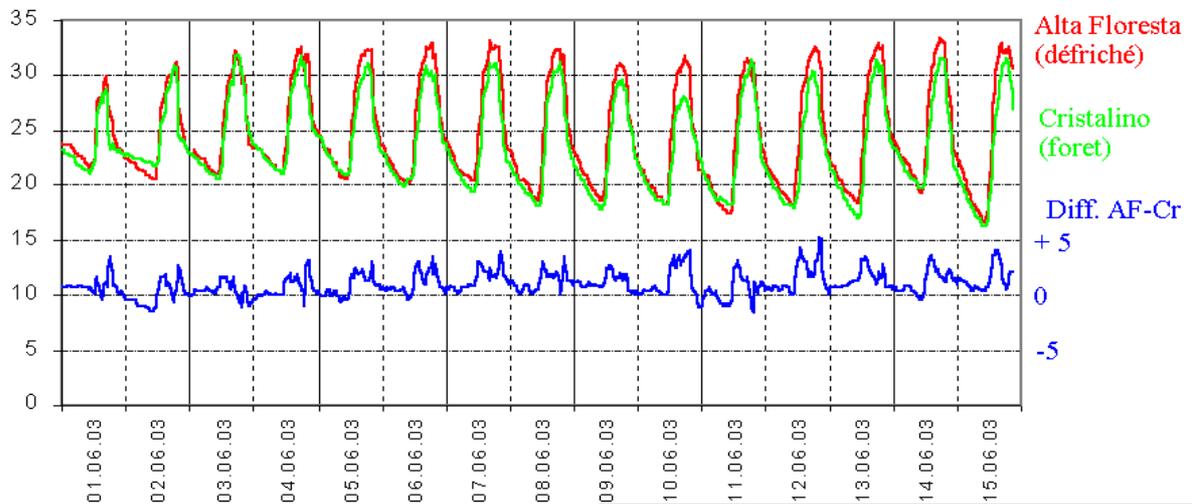
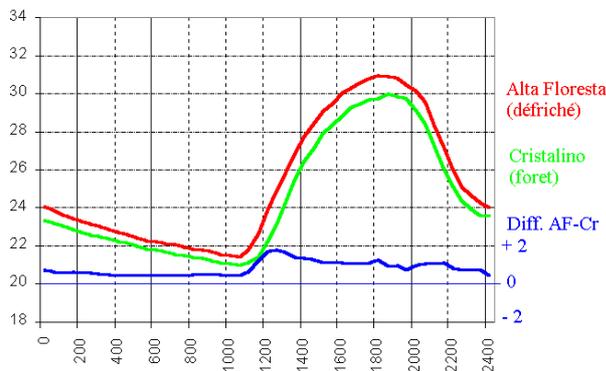
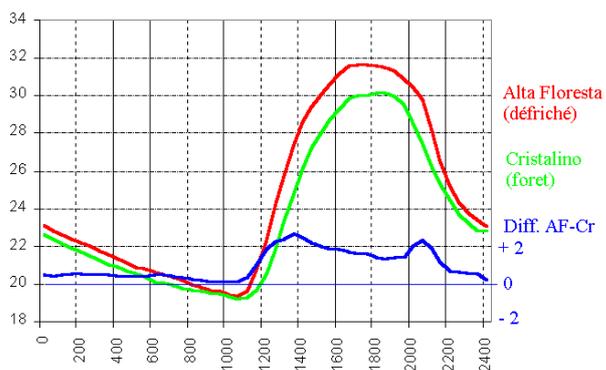


Figure 3.40 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/06/2003 au 15/06/2003 dans la région d'Alta Floresta : relevés horaires (au dessus) et moyennes sur la période (ci contre). [heure UTC=locale+4]

Synthèse des observations :

	Tn	Tx	Tnn	Txx	F(m/s)	Hum	Pmm
AF	19,3	32,4	16,6	33,4	4,0	80	--
Crist	19,1	31,1	16,2	32,1	1,6	89	27



La région d'Alta Floresta (10°S et 56°W environ), se situe dans le tiers sud de la forêt ombrophile dense amazonienne, sur le versant sud de la Serra do Cachimbo (Pará) dans une large boucle que décrit le fleuve Teles Pires (figure n°3.36). La mise en valeur de cette région a commencé dans les années 1970 en marge de la BR-163 (route Cuiabá-Santarém). Une intense exploitation aurifère a précédé puis accompagné une importante vague d'immigration et de défrichements. Cédés à la firme Indeco, les terres ont en effet rapidement été loties et distribuées à des propriétaires venus essentiellement du sud du pays (Etats de Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul). Largement couverte de pâturages, la région d'Alta Floresta tire aujourd'hui l'essentiel de ses revenus de la production de viande bovine. Avec 40000 habitants, la ville d'Alta Floresta est devenue le centre économique de l'extrême nord de l'Etat et un centre administratif et tertiaire (universités, hôpitaux, etc.) ainsi qu'une étape indispensable vers les nouveaux centres pionniers situés plus à l'ouest.

Les relevés climatiques de la figure 3.37 montrent que, à la fin février et au début du mois de mars, soit dans la deuxième moitié de la saison des pluies, la différence entre la zone forestière et les pâturages est très sensible en journée et surtout au cours de l'après-midi (+2°C vers 20h00 UTC). Les observations montrent des écarts souvent supérieurs à 4°C et même supérieurs à 6°C pour 3 journées. La moyenne des minima et des maxima confirme le plus important réchauffement diurne de la zone rurale : +0,2°C pour les minima contre +1,7°C pour les maxima. Même si, en cette saison, l'activité végétale des pâturages est importante, le flux de chaleur sensible y reste bien supérieur à celui observé en forêt et contribue à y maintenir, en cours de journée, des températures plus élevées.

Le mois d'avril (figure 3.38), qui reste bien arrosé avec 210mm mesurés, confirme le plus fort échauffement diurne du secteur rural : les chiffres sont proches de ceux du mois de mars avec un écart de près de 1°C pour les maxima et des écarts supérieurs à 5°C vers 20 heures pour 3 journées également. Si l'écart moyen apparaît moins fort que pour le mois de mars en fin d'après midi, ceci est dû essentiellement aux trois après-midi fortement couvertes et pluvieuses qu'a connu la région d'Alta Floresta les 7, 15 et 27 avril (écart de 4 à 5°C en faveur de la forêt). Notons qu'en première partie de nuit, les températures de la forêt deviennent significativement plus basses (0,5°C environ) qu'au-dessus des pâturages. Cette tendance se confirme au mois de mai (figure 3.39) avec des moyennes des minima plus élevées d'un demi-degré à Alta Floresta par rapport au Cristalino. Le cycle diurne, favorable aux pâturages se retrouve également avec un avantage plus net au début de matinée pendant lequel l'air se réchauffe plus vite au-dessus des pâturages, la forêt conservant une certaine fraîcheur.

Le mois de juin (figure 3.40), véritable début de la saison sèche après les dernières pluies conséquentes de la fin du mois de mai, permet de confirmer le faible écart thermique nocturne favorable aux pâturages (+0,5°C de 0h00 à 8h00) et surtout le fort écart thermique diurne, également au bénéfice des pâturages. Cet écart thermique diurne est toujours supérieur à 1,5°C et dépasse 2°C en début et en fin de journée. L'écart des maxima est donc sensible +1,3°C au détriment de la forêt, mais avec une seule journée avec un écart maximum supérieur à 5°C (mais sur une durée d'observation de 15 jours uniquement). La différence de l'humidité relative moyenne devient également plus sensible avec près de 10% d'écart, la forêt conservant un taux d'humidité bien plus élevé : cet écart n'a d'ailleurs fait que croître depuis le début des mesures : +2% en mars, +4% en avril, +6% en mai, +9% en juin, toujours

au profit de la forêt : dans le Rondônia, les mesures d'humidité spécifique sont respectivement de 15,8 et 13,4g/kg pour la forêt et les pâturages pendant la saison sèche (Von Randow et al., 2004). En revanche, le vent reste toujours deux fois plus fort dans la campagne d'Alta Floresta : malgré la plus grande turbulence de l'air dans la zone rurale qui contribue à brasser et homogénéiser les basses couches, ceci ne compense pas l'écart de température au bénéfice des pâturages.

Au total, le secteur défriché d'Alta Floresta apparaît toujours globalement plus chaud et plus sec (de 5 à 10%) que la région forestière du Cristalino. Cet écart est surtout marqué en journée où il atteint en moyenne près de 2°C mais semble également augmenter pendant la nuit avec l'arrivée de la saison sèche (+0,5°C). Cet écart est d'autant plus significatif que la turbulence est plus forte sur les pâturages. Ces données d'observation doivent maintenant être confrontées aux données obtenues par la modélisation

3.4. Modélisation des conséquences climatiques de la déforestation à l'échelle régionale

341- Des recherches surtout concentrées sur les répercussions régionales « larges » de la déforestation en Amazonie

La plupart des travaux portant sur les conséquences environnementales de la déforestation en Amazonie insistent, le plus souvent, sur les répercussions aux échelles climatiques globale (cycles de l'eau et du carbone) et locale (érosion des sols). Ce phénomène n'est pas propre à l'Amazonie puisque, dans la plupart des autres domaines tropicaux, une constatation similaire peut être faite. Il est somme toute logique que l'ampleur des changements observés conduise les chercheurs à orienter leurs travaux sur les conséquences globales de la déforestation. Cependant la simplification des modèles globaux (maille large, processus d'interactions et géographie simplifiés) a longtemps limité leur domaine d'utilisation à des simulations elles aussi simplifiées (déforestation totale du domaine tropical, modification d'un seul paramètre).

Ainsi, l'albédo étant le principal élément modifié lors du changement d'utilisation du sol, les recherches ont d'abord concerné l'impact, présumé direct de cette modification. Pour l'Afrique, la théorie de Charney (1977), selon laquelle la diminution de la végétation (en zone sahélienne) entraîne une modification de l'albédo et donc du bilan énergétique en réduisant les précipitations, a été largement diffusée. En fait, Courel (1984) a montré que pour le Sahel la diminution du couvert végétal sur le long terme n'entraînait pas systématiquement une augmentation de l'albédo ; en outre, la non-prise en compte de l'humidité du sol est une faiblesse importante de ce genre d'approche. Finalement, les études récentes montrent que *« la dégradation des espaces guinéens pèse plus que la désertification sahélienne sur l'évolution potentielle du climat car ce facteur affecte plus le gradient méridien d'énergie (...), la déforestation en zone guinéenne, par une diminution locale du flux de chaleur latente et par un changement au niveau régional des gradients méridiens et verticaux d'énergie, limiterait le potentiel pluviométrique du flux de mousson, même au Sahel »* (Bigot, 2004)

En Amazonie également, toujours en s'appuyant sur le fait que la première conséquence climatique de la déforestation est une augmentation de l'albédo de la surface, Nobre et al. en 1991 (avec un albédo moyen de la forêt amazonienne de 0,12 contre 0,21 pour les pâturages) ont obtenu une diminution de globale de l'ETR de l'ordre de 25 à 30 % avec pour conséquence une diminution des précipitations d'environ 20 % dans l'hypothèse d'un défrichement de l'ensemble de l'Amazonie. Diverses simulations ont été réalisées par plusieurs équipes avec des résultats parfois contradictoires notamment pour la convergence d'humidité et l'intensité convective de la ZCIT (Polcher & Laval, 1994) et la nature des interactions entre les cycles de l'eau et du carbone (Betts et al., 2004 ; Huntingford et al., 2004). Malgré tout, la synthèse des modèles sur l'impact de la déforestation (remplacement de la forêt par des pâturages) sur le climat montre systématiquement une baisse de l'évapotranspiration liée à l'augmentation de l'albédo (moins d'énergie absorbée), à la diminution de la rugosité, du volume racinaire et de la surface foliaire. La baisse de l'évapotranspiration entraîne également une hausse de la température de surface. La plupart des modèles (mais pas tous, tableau 3.3) prévoient une baisse des précipitations liée à la réduction de la convection due à l'augmentation de l'albédo et à la baisse de la rugosité. La

divergence des modèles est forte sur le ruissellement (Letteau et al., 1979 ; Ichii et al., 2003) surtout si on ne simule qu'une déforestation partielle...

Référence	Dickinson et Kennedy (1992)	Henderson-Sellers et al. (1993)	Lean et Rowntree (1993)	Polcher et Laval (1994)	Sud et al. (1996)	Manzi et Planton (1996)	Lean et Rowntree (1997)	Hahmann et Dickinson (1997)	Costa et Foley (2000)
AGCM	CCM1	CCM1-OZ	UKMO	LMD	GLA	EMERAUDE	UKMO	RCCM2	GENESIS
Résolution	4,5° x 7,5°	4,5° x 7,5°	2,5° x 3,75°	2,0° x 5,6°	4,0° x 5,0°	2,8° x 2,8°	2,5° x 3,75°	2,8° x 2,8°	4,5° x 7,5°
Durée de la simulation	3 ans	6 ans	3 ans	1,1 an	3 ans	3 ans	10 ans	10 ans	15 ans
ΔP (mm/jour)	-1,4	-1,6	-0,8	+1,1	-1,5	-0,4	-0,4	-1,0	-0,7
ΔE (mm/jour)	-0,7	-0,6	-0,6	-2,7	-1,2	-0,3	-0,8	-0,4	-0,6
ΔR (mm/jour)	-0,7	-0,9	-0,2	+3,8	-0,3	+0,3	+0,4	-0,6	-0,1
ΔT (mm/jour)	+0,6	+0,6	+2,1	+3,8	+2,0	+1,3	+2,3	+1,0	+1,4

Δ : Différence entre la situation actuelle (S_A) et la simulation (S_I) pour :
 P : précipitations, E : évapotranspiration, ΔR : Ruissellement, ΔT : Température de surface
avec $\Delta = S_I - S_A$ et $R = P - E$

Tableau 3.3 : Comparaison des résultats de simulation sur l'impact climatique régional d'une déforestation totale de l'Amazonie (Source : Durieux, 2002)

En comparaison, les travaux basés sur les conséquences climatiques observées de la déforestation en Amazonie sont finalement assez peu nombreux (Cauduro et al., 1995). L'absence de longue série de mesures (in-situ et satellitaires) et la faible densité du réseau d'observation (voir 2^e partie) expliquent pour une large part cet état de fait. Cependant, les premiers travaux sur le changement climatique en Amazonie à partir des observations OLR ont montré une légère tendance à l'augmentation de la convection et des précipitations depuis 15 ans, surtout à l'ouest du bassin et une légère baisse en Amazonie méridionale mais la tendance n'est jamais significative (Chu et al., 1994).

Durieux (2002, 2003), utilisant les données D2 de l'ISCCP de 1984 à 1993 sur 3 paires de sites tests (déboisés et non-déboisés) de 2°5x2°5 a montré que « l'impact de la déforestation sur la couverture nuageuse au cours de notre période d'étude n'est pas directement visible à l'échelle interannuelle au niveau d'une cellule de grille de 2°5x2°5 . En revanche nous observons une tendance climatique d'échelle plus large qui affecte l'ensemble de l'arc de déforestation : (...) décroissance de la couverture nuageuse totale et de la couverture de nuages hauts ». Ces tendances sont plus marquées pendant la saison sèche : forte diminution de la couverture de nuages hauts pendant la saison sèche (surtout la nuit et le matin) et au contraire augmentation pendant la saison humide (toujours pendant la nuit mais sur une période plus courte). Mais pendant la saison sèche on observe « une augmentation de la couverture de nuages bas principalement composée de cumulus en début d'après midi » (voir également Cutrim et al., 1995). Il observe, en outre que, en dessous de 10% de déforestation sur un secteur donné, on n'enregistre pas de changement notable et que les changements ne deviennent sensibles qu'à partir de 20% de la déforestation. Il note, cependant que la forte variabilité interannuelle (ENSO et LNSO) pourrait seule en être la cause ! « La tendance générale du changement climatique produit par la déforestation semble être en particulier une augmentation de la saisonnalité, c'est à dire des saisons sèches plus marquées et plus longues et des précipitations plus violentes durant la saison des pluies (...) » (Durieux, 2002). Des résultats similaires sont présentés par Fu & Li (2004) à partir d'une étude des réanalyses du centre européen (ECMWF) de 1979 à 1993. Enfin, Marengo (2004) note que la tendance

observée à partir de l'ensemble des séries pluviométriques disponibles de 1950 à 1998 est une diminution des pluies pour l'ensemble du bassin amazonien avec une baisse surtout sensible au nord alors que la tendance est légèrement positive au sud. Comme la déforestation est surtout importante dans la moitié sud de l'Amazonie, on voit que **le lien entre déforestation et modification climatique à l'échelle de l'ensemble du Bassin n'a pas encore été explicitement et formellement observé.**

Finally, the experiences of modeling show that, due to a lack of validation in-situ data and coherent, the results can diverge rapidly. In addition, the jump in scale between local data and global modeling is too important and requires a better understanding of the interactions soil-vegetation-atmosphere whose nature and intensity may not be the same at different scales. At regional and fine scales, the forcing linked to surface conditions becomes stronger (Gandu et al., 2004 ; Silva Dias et al., 2004 ; Calvet et al., 1997) and requires a more explicit consideration in the modeling. However, « *the availability of data with the geographical detail necessary is currently the major limitation of modeling rather than the capacity of calculation or of comprehension* » (Bigot, 2004). In this sense the resolution and the repetitiveness of satellite data must allow to provide the necessary data to the models.

342- Cadre d'étude et méthodologie de l'expérimentation à méso-échelle :

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les conséquences climatiques de la déforestation au Mato Grosso à une échelle intermédiaire c'est à dire régionale (*meso-scale*). Beaucoup moins de travaux existent en effet à ce niveau scalaire (Pielke et al., 1991): pour juger d'un éventuel effet à cette échelle il faudrait pouvoir disposer de longues séries de mesures (avant et après la déforestation), séries qui n'existent pas dans le Mato Grosso puisque les mesures ont la plupart du temps commencé lors de la mise en valeur agricole.

Le choix de la région d'étude se porte sur un secteur de forêt dense suffisamment défriché depuis une trentaine d'années pour pouvoir entraîner des conséquences significatives sur les éléments du climat. Comme le massif forestier amazonien est « attaqué » par ses marges on ne dispose en fait que de peu d'espaces défrichés sur un vaste périmètre, les secteurs de défrichements au cœur du massif étant souvent linéaires et finalement trop dilués dans la forêt pour avoir un impact climatique significatif à méso-échelle. Au cœur du massif, seules les régions du Rondônia, de l'est du Para et du nord du Mato Grosso disposent des conditions idéales pour ce type de problématique. Des expérimentations sont d'ailleurs déjà en cours dans le Rondônia dans le cadre du programme international LBA. C'est dans le troisième secteur précédemment cité que se situe ce travail.

Quelques modèles ont déjà été utilisés pour tester la sensibilité des éléments du climat aux modifications du couvert végétal pour les répercussions de la déforestation en Amazonie (Garratt, 1993 ; Silva Dias et al., 2000 et 2002). Notre démarche privilégiant l'échelle régionale, on a choisi d'utiliser le modèle méso-échelle RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*). Ce travail a été mené dans le cadre d'une coopération entre COSTEL et le laboratoire LaMP (Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand) où le RAMS est implanté. Le

RAMS, développé par l'Université du Colorado (USA), est un modèle parallélisé (version 4.3 de 2001, Cotton et al., 2003) qui permet la simulation ou la prévision de circulations atmosphériques dont l'échelle spatiale s'étend de moins de 1 km au millier de km (Pielke *et al.*, 1992 ; <http://rams.atmos.colostate.edu/detailed.html>). C'est un modèle non-hydrostatique, qui prend donc en compte les hétérogénéités de surface ainsi que les processus de convection et de condensation (figure 3.41). La circulation générale et la dynamique d'échelle locale sont intégrées au moyen de grilles imbriquées. Un forçage de large échelle permet de prendre en compte l'évolution du temps toutes les six heures. Les utilisations du modèle RAMS sont nombreuses : dans une trentaine de pays, il est aussi bien utilisé pour la prévision du temps (Cotton et al., 1994), pour des évaluations de stratégies dans le domaine de la qualité de l'air, pour l'étude de circulations locales (Siva Dias et al., 2004 ; Bonnardot et al., 2001 ; Planchon et al., 2000)...

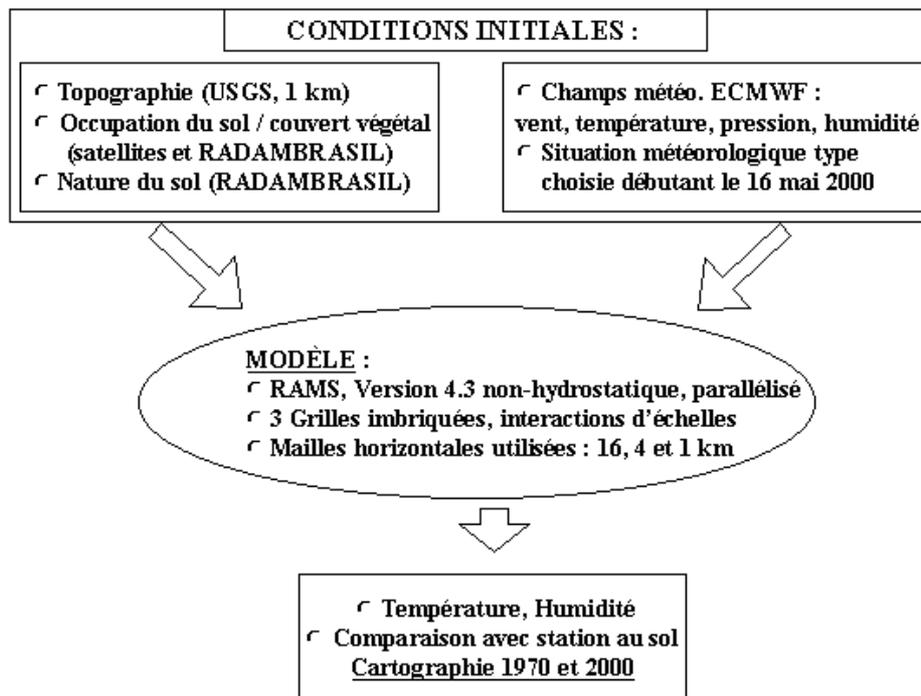


Figure 3.41 : Schéma des étapes et des choix réalisés pour la modélisation à méso-échelle RAMS

Le modèle RAMS intègre :

1. Une analyse objective sur différents niveaux qui permet l'initialisation du modèle à partir de données météorologiques telles que les analyses du centre européen de Reading (CEPMMT), l'assimilation des radiosondages locaux (non disponibles pour notre étude) et les paramètres atmosphériques relevés par les stations météorologiques au sol (non intégrés également mais qui serviront pour la validation).
2. Un modèle sol et végétation décrivant les interactions sol-végétation-atmosphère (LEAF2). 30 classes de végétation et une classe urbaine sont incluses. La surface est représentée par une fraction de sol nu, éventuellement construit et des fractions des différents types de végétation. Le modèle de sol prend en compte les différents types de texture du sol, les gradients de température et d'humidité en profondeur sur 8 à 10 niveaux (Nicholls et al., 1992).

3. Un modèle de nuages dont la phase glacée est représentée par 5 classes d'hydrométéores (Walko et al, 1995).
4. Un module qui permet la visualisation des résultats obtenus.

Les circulations locales peuvent être simulées grâce à des grilles imbriquées (jusqu'à 8) dont le rapport d'échelles est compris entre 3 et 5. La circulation atmosphérique se déroulant à l'échelle supérieure à celle de la plus grande grille est induite au moyen d'un forçage aux limites du domaine. La communication entre les différentes grilles suit la procédure de Clark et Farley (1984). La structure retenue ici comporte 3 grilles imbriquées (figure 3.42) de 50 par 50 points chacune et un domaine s'étendant de la surface à 17 km d'altitude. La grille 1 a une résolution de 16 km et couvre donc 800x800 km. La grille 2 a une maille de 4 km (200x200 km) et la grille 3 concerne la proche région d'Alta Floresta avec une maille de 1 km.

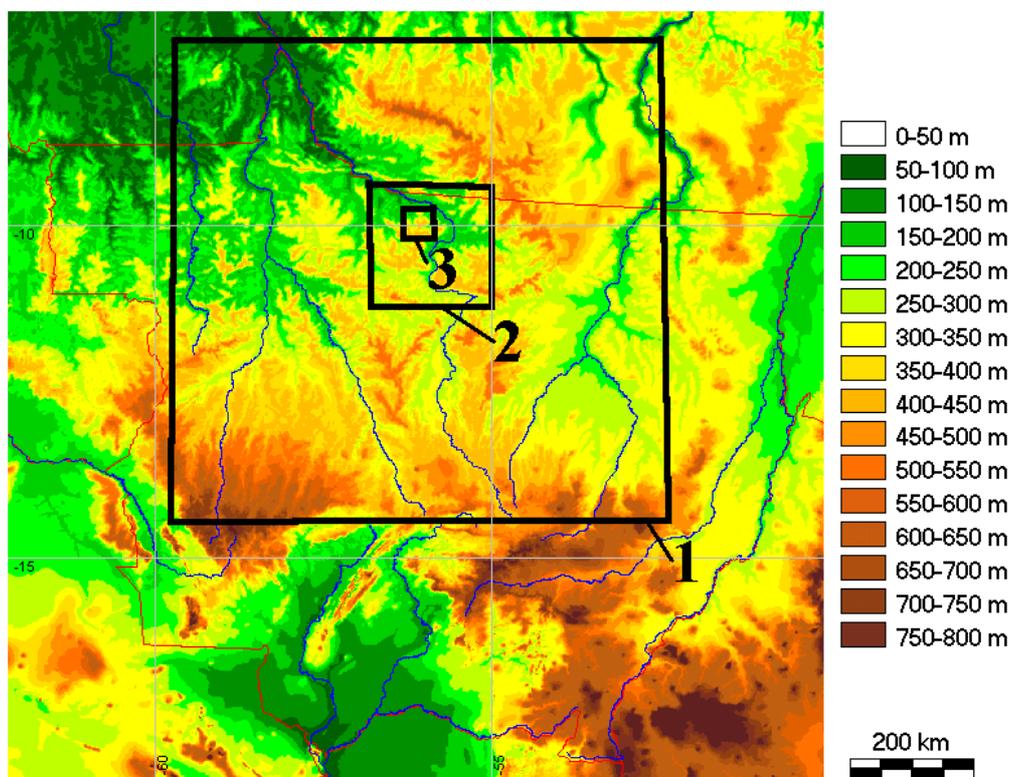


Figure 3.42 : Relief et grilles utilisées pour la modélisation à méso-échelle

Afin de préciser les paramètres d'entrée du modèle et de rendre les simulations les plus réalistes possible les fichiers de végétation et d'occupation du sol fournis par imagerie satellitaire sont retenus. A échelle fine les données de base de l'occupation du sol sont fournies par les satellites Landsat TM dont la résolution (30 mètres) peut être dégradée au niveau convenu. A partir de la scène Landsat TM (figure 3.43), une classification automatique permet de regrouper les pixels en 3 classes : en 1999, la forêt ombrophile n'occupe plus que 36 % de l'espace, la ville 1 %, le reste étant mis en culture ou en pâturages (tableau 3.4). On considère que cette occupation du sol de 1999 n'a pas subi d'importantes modifications en 2000, année où le contrôle terrain, les mesures climatiques et la simulation sont réalisés.

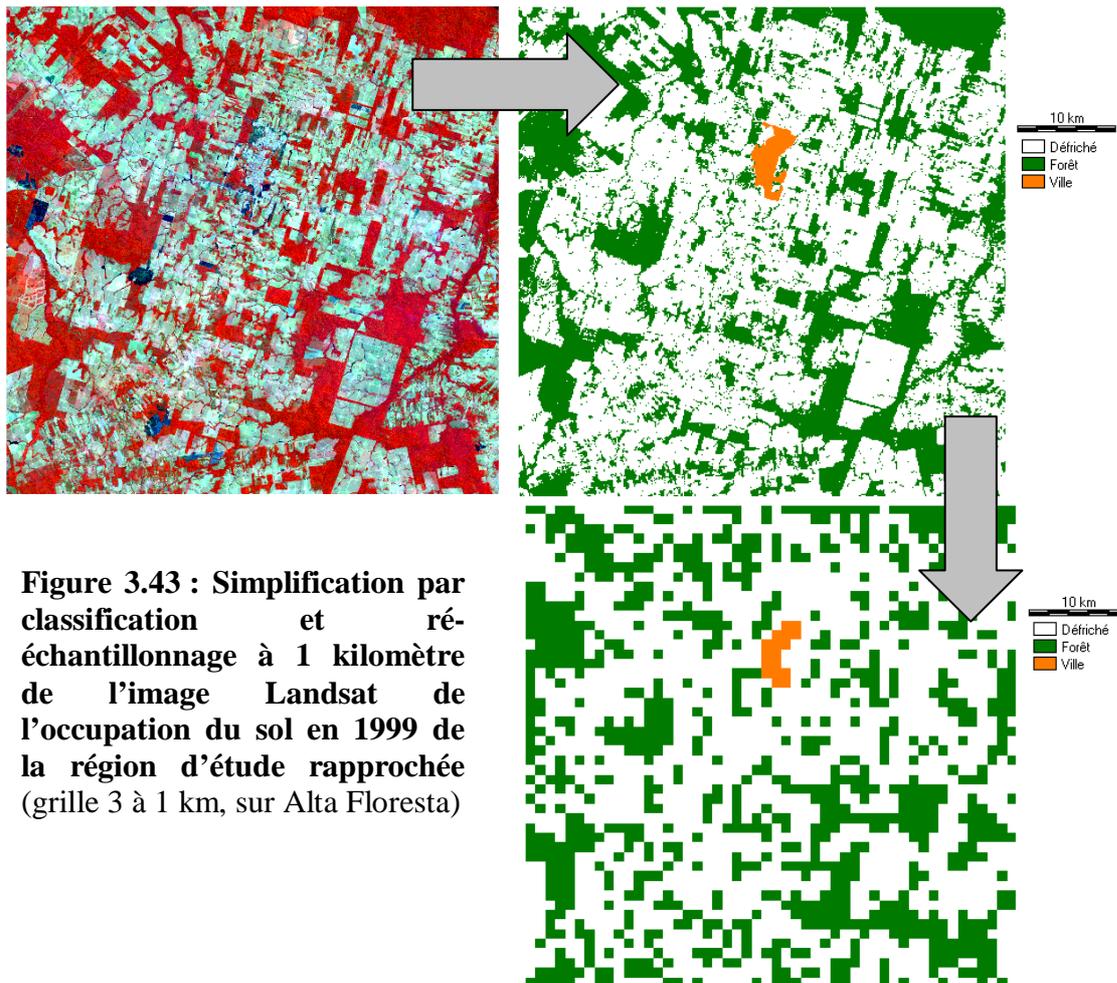


Figure 3.43 : Simplification par classification et ré-échantillonnage à 1 kilomètre de l'image Landsat de l'occupation du sol en 1999 de la région d'étude rapprochée (grille 3 à 1 km, sur Alta Floresta)

Tableau 3.4 : Résultats de la classification de l'image Landsat de 1999 :

Classe	Surface (ha)	Surface (%)	Interprétation
1	60979	24.4	Forêt dense « préservée »
2	58822	23.5	Parcelle défrichée : pâturage
3	39786	15.9	Défrichement récent partiel
4	30038	12.0	Forêt déjà dégradée
5	28056	11.2	Défrichement en cours
6	27061	10.8	Parcelle défrichée, sol nu
7	3411	1.4	Brûlis récent
8	1798	0.7	Ville d'Alta Floresta
Total :	249951	100	TOTAL

A plus large échelle, et pour couvrir un espace plus vaste, ce sont les données NOAA-AVHRR (1,1 km) qui sont utilisées. Pour cette famille de capteurs on dispose d'un suivi pluriannuel de la région d'étude depuis la fin des années 70 mais 2 dates clés sont retenues ici : 1970 (avant la colonisation), 2000 pour la période actuelle. La figure 3.44 (A et C) montre l'état de la végétation telle qu'elle existait avant la colonisation agricole : ces données sont extraites des missions radar aéroportées RADAM réalisées dans les années 70 (Radam-Brasil, 1983). La figure 3.44 (B et D), déduite des images NOAA, montre les profondes modifications intervenues dans l'occupation du sol à la fin du vingtième siècle. Ce sont donc précisément les conséquences climatiques de ces transformations à différentes échelles qu'il faut maintenant étudier.

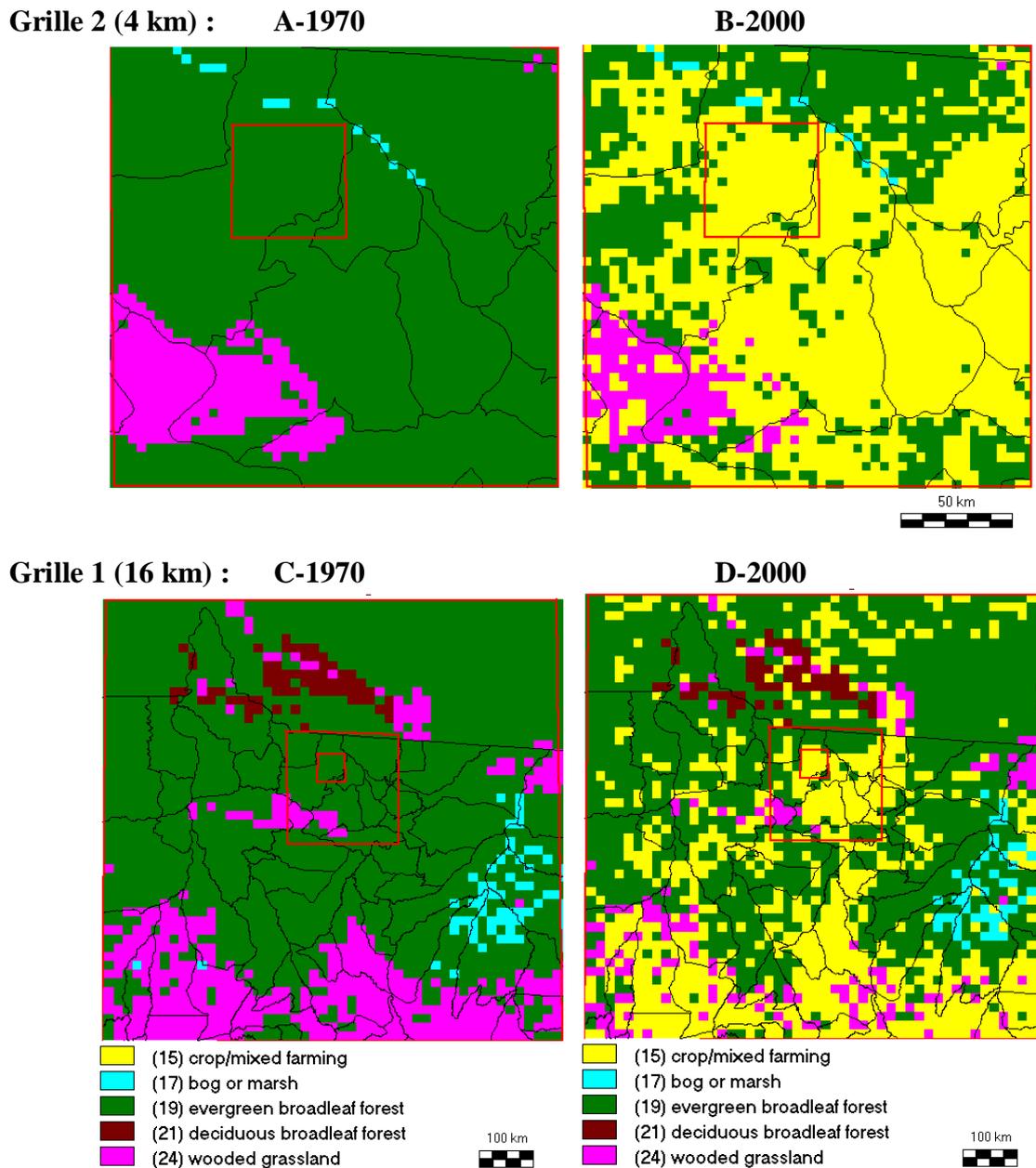


Figure 3.44 : Données d'entrée du modèle RAMS : couches végétation des grilles 1 (en bas) et 2 (en haut) pour 1970 (à gauche) et 2000 (à droite). Les limites des municípios (en noir) et des grilles RAMS inférieures (en rouge) sont indiquées.

343- Résultats de la simulation climatique à méso-échelle :

Deux simulations (« 2000 » et « 1970 ») sont réalisées en partant des mêmes conditions atmosphériques initiales (CEPMMT) à savoir celles du 16 mai 2000 à 0h UTC. Dans les deux simulations effectuées, le relief et le type de sol sont identiques en vue de caractériser l'effet du changement de couvert. L'humidité relative initiale du sol a été assignée à 60% pour la simulation « 1970 » : cette valeur est le plus couramment retenue pour les modélisations en milieu forestier tropical (Dias & Regnier, 1996). En l'absence de mesures in-situ, l'humidité initiale du sol a été fixée à 35% pour la simulation « 2000 », cette valeur étant plus

représentative des domaines de savanes herbeuses (Cautenet et al., 1999). Enfin, on suppose l'absence d'apport en eau (pluie ou précipitation) et on examine les résultats après trois jours (soit le 19 mai) pour permettre au modèle de se stabiliser (Cautenet et al., 2000)

La première simulation prend en compte l'occupation du sol observée par télédétection en 1999-2000. Une deuxième simulation est ensuite réalisée en reprenant les conditions atmosphériques initiales du 16 mai 2000 mais en changeant la couverture du sol : on affecte cette fois les codes du couvert végétal correspondant à la végétation telle qu'elle existait au début des années 70. Le contrôle de la cohérence des sorties du modèle s'appuie sur une campagne de mesures sur le terrain effectuée en mai 2000 au moyen de stations automatiques Davis Instruments (type Weather Monitor II) implantées dans le secteur d'Alta Floresta. La figure 3.45 montre que la calibration précise du modèle n'est pas encore optimale dans cette première expérimentation mais que les ordres de grandeur sont réalistes pour ce qui concerne le rythme diurne (amplitude thermique diurne mesurée et modélisée de 11°C.), les températures fournies par le RAMS apparaissant surestimées, notamment en début de nuit. Cependant, en considérant que celles-ci soient les erreurs dues au modèle, et en retranchant ces valeurs à l'écart entre les températures 2000 et 1970 (figure 3.46) on obtient des écarts thermiques réalistes entre la forêt et les pâturages et qui, surtout, reflètent bien le cycle diurne des écarts observés dans les observations de la section précédente (écarts plus marqués le jour).

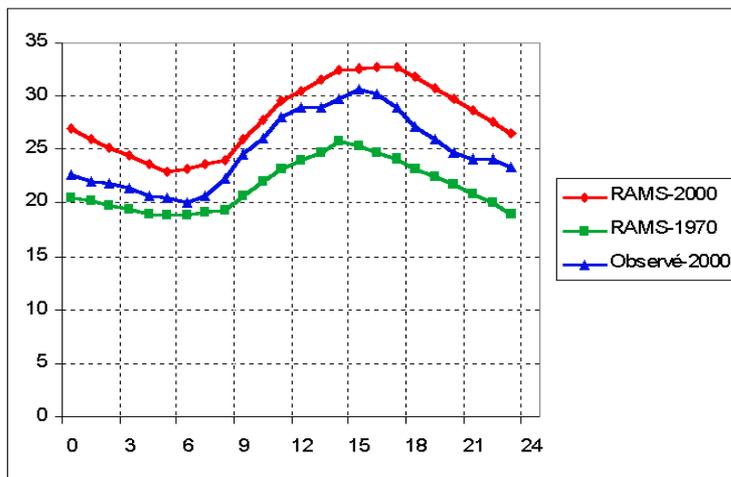


Figure 3.45 : Profils thermiques horaires pour la journée du 19 mai 2000 : comparaison entre les données simulées par RAMS en 1970 (forêt, en vert), 2000 (défriché, en rouge) et les observations de contrôle réalisées en 2000 (en bleu)

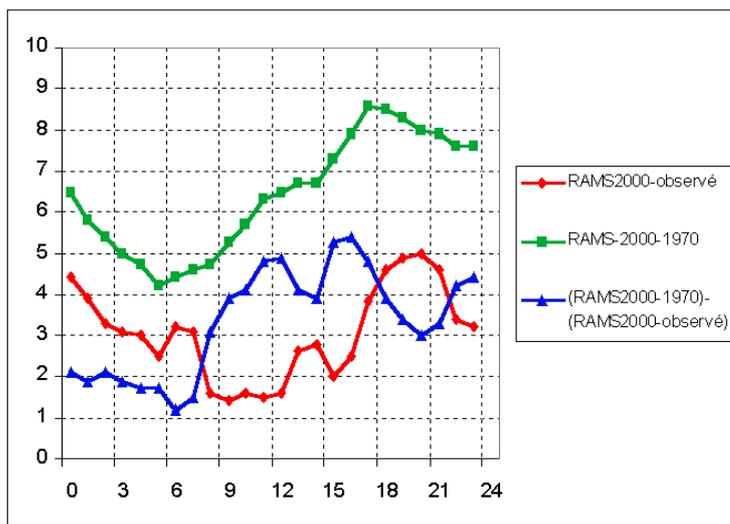


Figure 3.46 : Profils thermiques horaires des différences constatées pour la journée du 19 mai 2000 : entre les deux simulations RAMS (vert), entre les données simulées par RAMS et les observations de contrôle en 2000 (rouge). En supposant que ces dernières soient les erreurs dues au modèle, la courbe bleue synthétise la différence défriché-forêt.

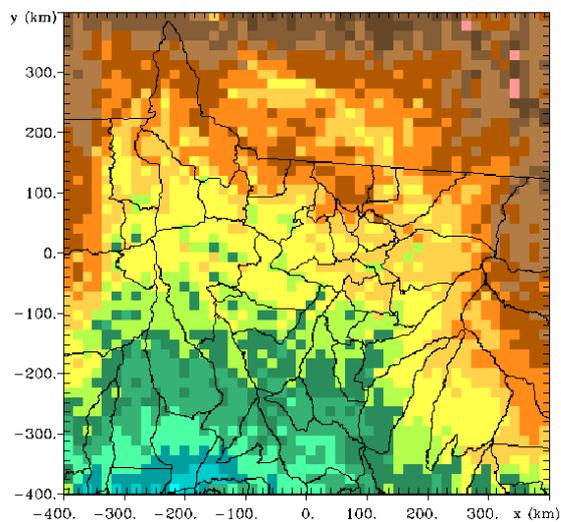
Les écarts les plus importants étant observés en fin d'après-midi, nous présentons ici les cartes de sortie de modèle de 18h00 locales. Les résultats de la figure 3.47 montrent l'accroissement de la température (vraisemblablement surestimée ici) consécutif au remplacement de la forêt par des pâturages. Les effets de marge sur la grille 1 sont importants puisqu'il s'agit de la grille à maille la plus large : ces effets, fréquents en modélisation numérique (notamment parce que tous les paramètres n'ont pas été ajustés à l'extérieur de la grille 1), disparaissent dans les résultats des grilles 2 et 3. Il faut remarquer que la répartition spatiale des températures est modifiée: sur la simulation « 1970 », elles sont homogènes et calquées sur la topographie, le couvert forestier étant, lui aussi, assez homogène. La simulation « 2000 » montre un effet relief plus estompé. En revanche, des contrastes thermiques plus marqués apparaissent en fonction de la présence d'îlots forestiers résiduels sur la grille 3. Sur les grilles supérieures, en revanche, les effets liés à l'occupation du sol semblent disparaître, comme si, à cette échelle et avec les résolutions choisies (4 et 16km), seuls les effets régionaux pouvaient être mis en évidence. C'est sans doute à ce niveau, entre la résolution infra-kilométrique et l'échelle pluri-kilométrique, que se situe le hiatus le plus important dans les liens entre occupation du sol et climat et les processus qui les déterminent.

L'humidité relative (figure 3.48) montre que la déforestation s'accompagne d'une baisse importante (de l'ordre de 40%) de l'humidité relative entre 1970 et 2000, les valeurs oscillant respectivement entre 70 et 30%. Les perturbations liées à l'orographie apparaissent nettement, comme pour les températures sur la grille 1 (Serra do Cachimbo plus « fraîche » et plus humide notamment sur la simulation 2000), ainsi que les effets de bord. La différence peut paraître importante entre les 2 simulations. Cependant, en tenant compte de la surestimation des températures par le modèle elle est compatible avec les différences observées sur le terrain : 15% de différence moyenne mesurée vers 18h00 entre Alta Floresta (69%) et Cristalino (84%) pour le mois de mai. A une résolution plus fine (grille 2) les modifications semblent affecter toutes les régions, y-compris celles où le déboisement est plus faible (au nord ou à l'ouest par exemple). Sur la grille 3, l'homogénéité, calquée comme pour les températures sur la topographie, laisse la place à un schéma plus complexe où la présence de forêts entraîne localement une hausse de l'humidité relative.

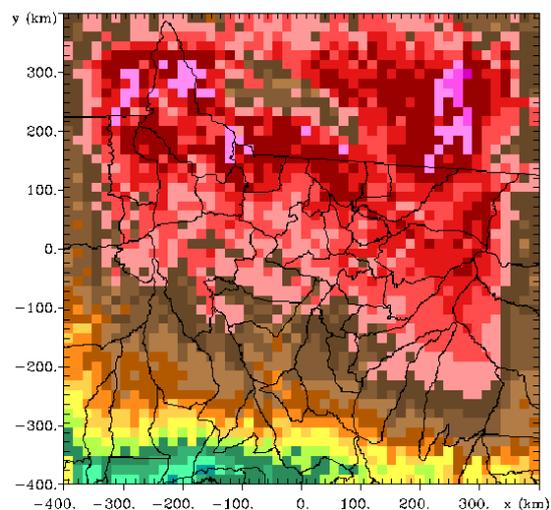
Au total, les résultats des simulations montrent un accroissement des températures et une baisse de l'humidité relative consécutifs à la déforestation. Cette première expérience confirme la sensibilité du modèle aux paramètres sol et végétation et aux conditions d'échanges dans la couche limite. En outre, les structures spatiales de ces paramètres deviennent beaucoup plus hétérogènes du fait du morcellement grandissant de la couverture forestière. On voit aussi l'intérêt d'utiliser des données de télédétection détaillées en entrée pour ce type de modèle à méso-échelle. Le calage du modèle par rapport aux mesures de terrain reste cependant imparfait, sans-doute en raison des imprécisions sur la paramétrisation de la manière dont le couvert interagit avec les conditions d'humidité du sol (Harris et al., 2004). Enfin, la poursuite de notre démarche vise à étendre ce type de modélisation en utilisant par la suite des sorties de simulation d'occupation du sol telles que présentées dans la première section de cette partie et déterminer les effets de seuil à partir desquels la déforestation a un impact sur le climat à une échelle donnée.

Les résultats présentés dans cette troisième partie étant encore préliminaires et les travaux en cours de développement, il paraît difficile de dresser une conclusion partielle à ce niveau, les principales pistes de recherche ayant, par ailleurs, été soulignées au fur et à mesure.

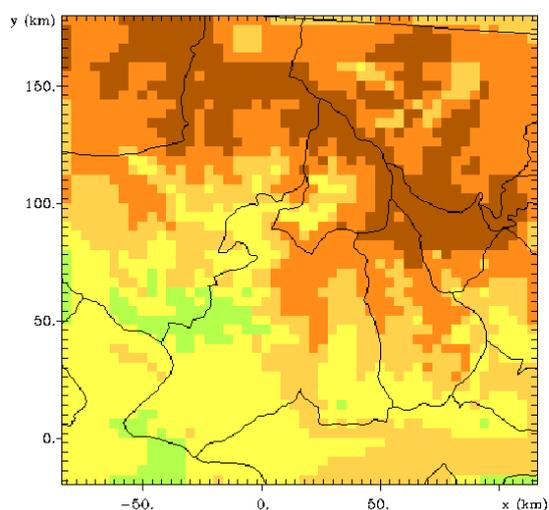
Grille 1 (16 km) : 1970



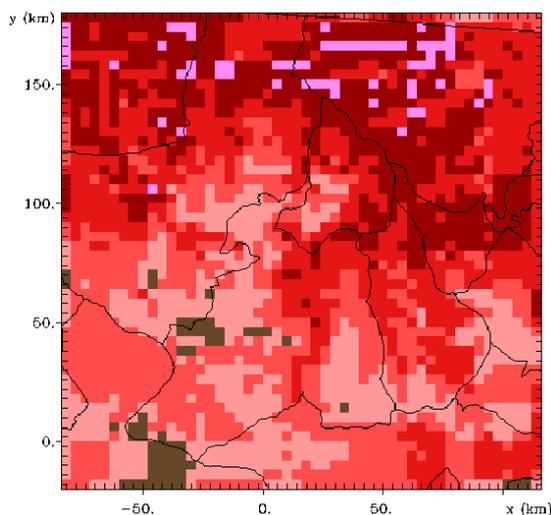
2000



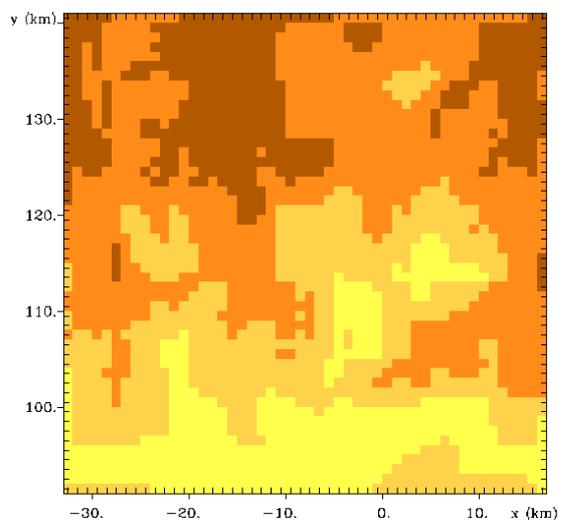
Grille 2 (4 km) : 1970



2000



Grille 3 (1 km) : 1970



2000

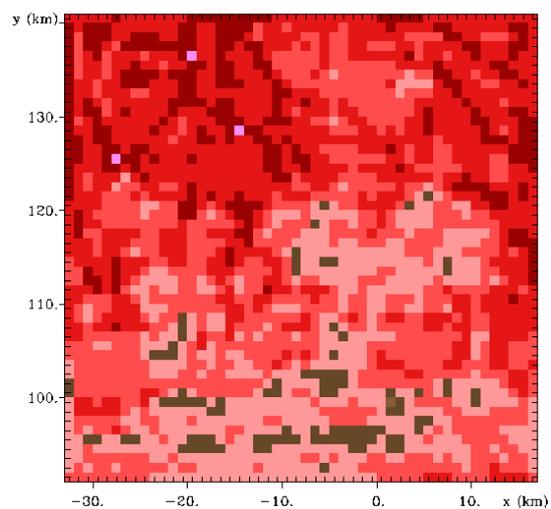
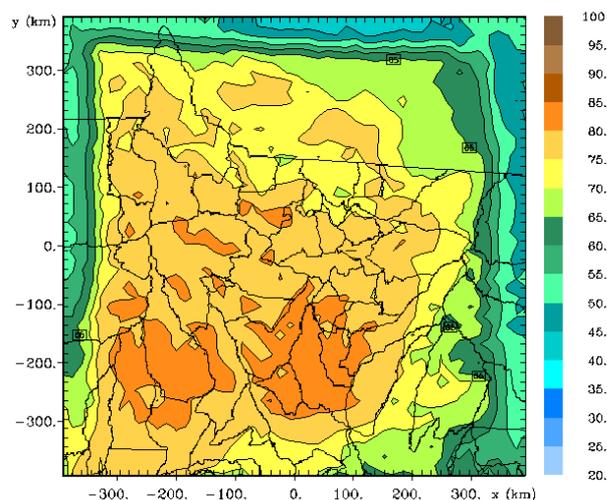
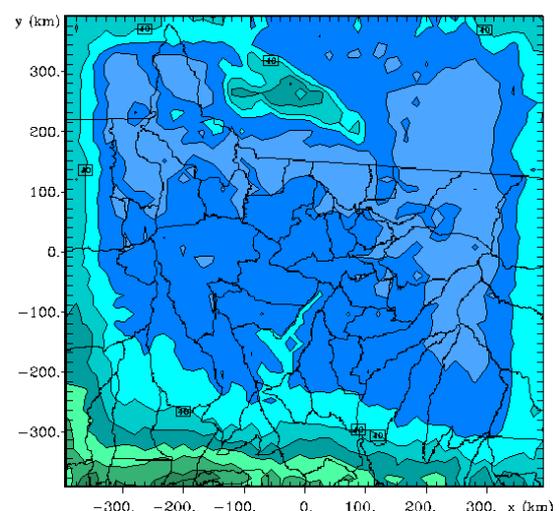


Figure 3.47 : Résultats de la simulation à méso-échelle pour les températures en 1970 (à gauche) et 2000 (à droite)

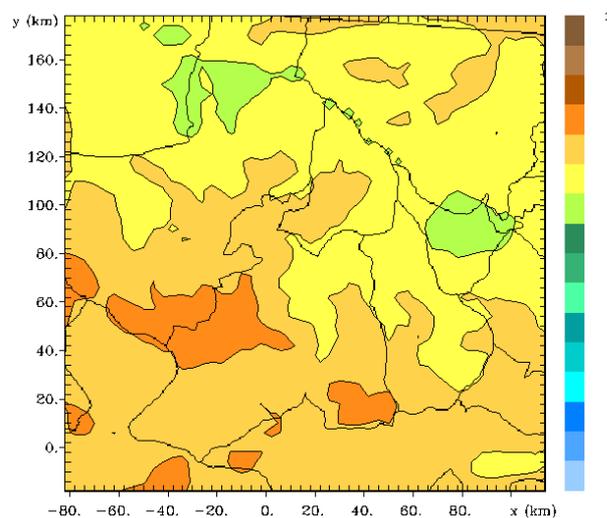
Grille 1 (16 km) : 1970



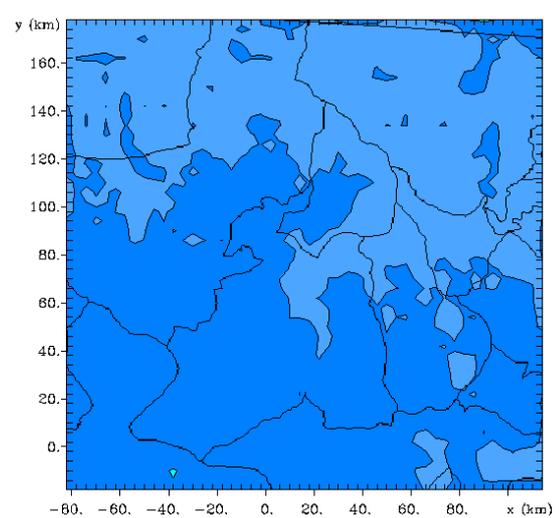
2000



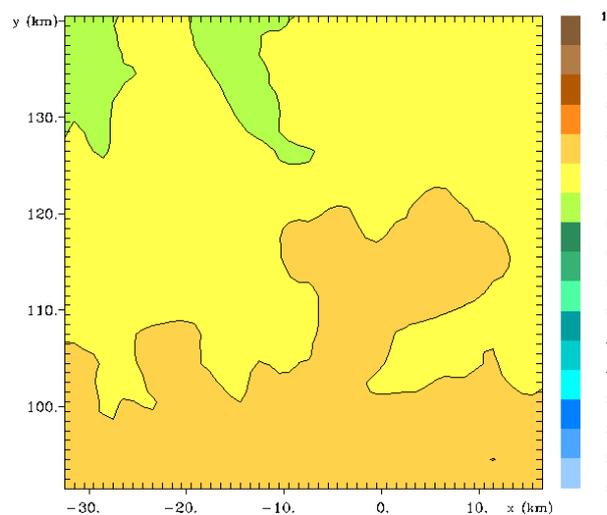
Grille 2 (4 km) : 1970



2000



Grille 3 (1 km) : 1970



2000

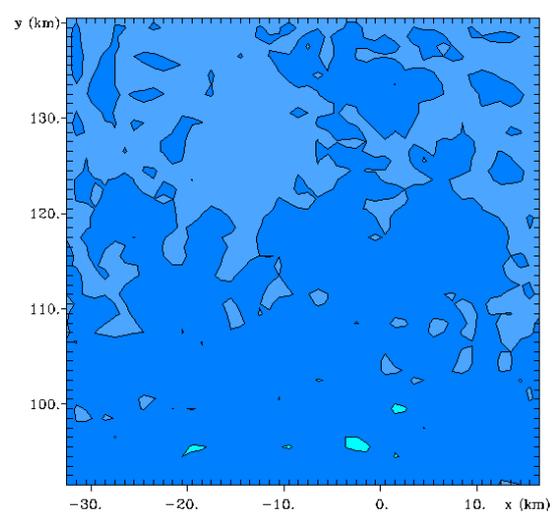


Figure 3.48 : Résultats de la simulation à méso-échelle pour l'humidité relative (en %) en 1970 (à gauche) et 2000 (à droite)

CONCLUSION GENERALE

Il ne s'agit pas ici de présenter une synthèse des principales conclusions qui ont été soulignées au fil du texte. Le projet, par sa diversité thématique et méthodologique, peut paraître ambitieux. C'est, en fait, la nature et la complexité des interactions entre nature et société dans des régions en transformation profonde et rapide comme l'Amazonie qui dictent au chercheur son attitude : ce type de recherche est nécessairement collective, interdisciplinaire et internationale ; elle associe, en outre, des démarches combinant mesures de terrain, expérimentation et modélisation tout en tenant compte les notions d'incertitude notamment celles concernant les changements d'échelle. Au bout du compte, si les interactions nature-société restent au cœur des grands enjeux contemporains et de mes préoccupations scientifiques, les résultats de notre recherche doivent être en mesure d'amener des éléments de réponse sur l'avenir des territoires des fronts pionniers amazoniens dont le Mato Grosso semble être une caricature.

Les interactions nature-société restent au cœur des grands enjeux contemporains et de mes préoccupations scientifiques

Dans le contexte des études sur les changements climatiques, le suivi de l'évolution de l'utilisation et de l'occupation des sols représente un enjeu important pour les années à venir. Dans des régions d'agriculture intensive telle que la Bretagne, des modifications intervenant au niveau de systèmes cultureux et des structures paysagères liées pour partie à ces changements climatiques peuvent avoir un impact important sur l'environnement, en particulier sur les ressources en eau. En retour, les changements produits sur les structures paysagères et les modes d'occupation des sols peuvent, comme l'illustre l'Amazonie, entraîner des changements climatiques locaux qui participent au changement global. Le suivi des changements intervenant dans la couverture végétale à une échelle régionale représente donc aujourd'hui un des enjeux majeurs de la recherche dans les applications du domaine spatial tant au niveau international (Programmes «Land Use/Cover Change Project » - référence Lucc Science Plan-, « IGBP/IHDP ») qu'au niveau national. La connaissance des variations spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation des sols est un des éléments-clé permettant d'effectuer des simulations de l'évolution des climats, notamment à partir de l'exploitation de longues séries d'images de satellites (Champeaux *et al.*, 2000).

Mais si les activités humaines contribuent à modifier le climat, elles restent aussi dépendantes de la variabilité climatique. Comme l'illustrent les rendements agricoles au Mato Grosso, ce lien est rarement déterministe. Les territoires sont des systèmes complexes où une seule cause peut difficilement avoir un impact univoque et encore moins uniforme. Le rôle du géographe est aussi de comprendre quelle est la nature des interactions entre l'homme et son milieu, quelles sont les intensités de ces interactions, participent-elles à l'évolution de nos sociétés et la façon dont elles organisent leur espace. En ce sens, si les liens sont très dépendants des conditions socio-économiques et techniques (comme le montre bien l'exemple de la sécheresse dans la France de l'ouest), la diversité spatiale de ces interactions est encore mal connue dans de nombreuses régions (en Amazonie notamment) et doit être relativisée en fonction de l'échelle considérée et des informations disponibles.

Une recherche devant davantage prendre en compte les notions d'incertitude notamment ceux concernant les changements d'échelle

Sur le plan spatial, les hypothèses formulées supposent que la télédétection est l'outil adapté pour apporter des éléments de réponses pertinents à trois problèmes complémentaires :

- Le suivi diachronique sur un même espace à partir de l'occupation du sol;
- On peut définir et observer en tout point du territoire les données climatiques essentielles (précipitations, températures), l'occupation du sol et les pratiques culturelles.
- Elle permet par une étude approfondie de faire la liaison entre les activités humaines, les modes de gestion du territoire, le paysage et les processus naturels dans une géographie globale et permettre ainsi une modélisation de la complexité du système territorial. En outre, « *policy and decision making in the context of sustainable development requires rapide, effective and efficient access to and integration of appropriate current information (...) derived from remotely sensed data* » (Chen, 2002).

Sur le plan technique, on peut espérer de meilleurs suivis avec des classifications plus fines grâce aux nouvelles générations de satellites comme TERRA-ASTER (Mendoza & al., 2004) disposant d'une meilleure résolution spatiale ; en ce sens les données MODIS sont particulièrement utiles pour les géographes car leur résolution intermédiaire de 250m vient combler un hiatus important entre les satellites d'occupation du sol (Landsat, SPOT) et les satellites météorologiques (NOAA-AVHRR, Météosat, GOES).

Mais l'évolution n'est pas seulement technique : on doit s'interroger aussi sur la nature des informations fournies par la télédétection, leur pertinence par rapport au problème posé, le degré de confiance (ou d'incertitude) que l'on peut leur donner. De ce point de vue notre travail a recours à ces informations de différentes manières :

- le satellite peut être un instrument de découverte et d'exploration du territoire (à condition de pouvoir valider la démarche sur des terrains supposés similaires) : dans ce cas, une forte incertitude existe sur les données disponibles.
- Il permet de visualiser des structures spatiales actuelles et/ou passées mais ayant des conséquences actuellement et susceptibles de se retrouver ailleurs dans des délais plus ou moins rapides. Dans ce cas, la rapidité des transformations paysagères justifie le recours à satellite, sous réserve que le contrôle terrain et l'image ne soient pas trop espacés dans le temps !
- Le satellite peut fournir des informations complémentaires et permettre d'interpoler (voir, sous certaines réserves d'extrapoler) certaines données comme nous l'avons vu pour la cartographie des précipitations au Mato Grosso. Les informations sont alors plus ou moins précises mais l'incertitude peut généralement être quantifiée.
- Les satellites permettent au géographe de mieux appréhender le problème du changement d'échelle, encore que très peu de travaux prennent réellement en compte le degré d'incertitude lié, par exemple, à la simplification des données quand on passe à un niveau scalaire supérieur.

- Les données satellitaires permettent de fournir des informations utilisées ensuite dans des modèles. Implicitement une incertitude nulle est affectée à cette couche d'information, l'incertitude étant reportée sur les sorties de modèle. Pourtant, une meilleure estimation de l'incertitude en entrée, ou la prise en compte de cette incertitude comme dans l'exemple de l'utilisation de Dempster-Shafer, devrait être effectuée.

Une recherche qui doit intégrer mesures de terrain, expérimentation et modélisation

Si il est illusoire de vouloir attribuer une capacité entièrement prédictive aux modèles, la démarche modélisatrice est importante car elle permet de poser des hypothèses de les formaliser sous forme mathématique et/ou logique. Ces règles de fonctionnement de l'espace doivent cependant toujours être testées et validées par l'expérience du terrain. Il ne s'agit pas de plaquer sur un espace une idée préconçue mais, à partir des observations in-situ (et des données satellitaires) de proposer des formulations simplifiées des mécanismes de fonctionnement et des processus en œuvre. Ces règles doivent pouvoir être reproductibles mais le géographe doit également prendre en considération deux aspects complémentaires : d'une part l'incertitude et l'imprécision des données et des formulations proposées, d'autre part, la nécessaire attention à apporter aux individus qui « ne rentrent pas dans le modèle », par exemple les résidus d'une régression linéaire. En effet, la connaissance de la diversité des situations de terrain, sans que celle-ci soit érigée en principe intangible sinon aucune modélisation n'est possible, permet d'enrichir la modélisation et trouver des règles complémentaires (pas nécessairement secondaires car l'ordre d'explication peut changer en fonction de l'échelle).

Construire une démarche modélisatrice suppose donc un va-et-vient incessant entre le terrain, la formalisation d'hypothèse, l'expérimentation et le calcul. Ceci implique de s'appuyer sur des jeux de données suffisamment structurés et avec une profondeur spatio-temporelle suffisante. Ainsi une modélisation spatiale permettra de définir en tout point une estimation de la probabilité de risque de déforestation par extrapolation des résultats plus fins obtenus sur des *municípios* bien connus servant de sites ateliers. La diversité des connaissances à mobiliser et des processus à maîtriser amène nécessairement le chercheur géographe à se tourner vers d'autres disciplines.

Une recherche nécessairement collective, interdisciplinaire et internationale

« *Le monde était compliqué. Il devient complexe* » (Levy, 1992, cité par Péguy, 2001). La complexité des éléments en interaction pour comprendre les liens entre les phénomènes naturels (pour nous le climat) et les faits sociaux ne peut être le privilège d'une seule discipline. En revanche la manière dont ceux-ci s'inscrivent et s'expriment dans l'espace ne peut être ignoré des géographes. C'est même pour nous une des essences de la discipline. Il ne s'agit pas d'affirmer que la géographie est au carrefour obligé des autres sciences et que le géographe aurait, seul, les clés de la compréhension du monde qui nous entoure. Ce travail a montré les nécessités

d'emprunter aux autres disciplines des concepts, la compréhension de processus (économiques, physiques,...), de mettre en oeuvre en commun des modèles.

Outre la pluridisciplinarité clairement affichée de ce projet, il faut également préciser qu'il s'appuie sur une collaboration avec des universités brésiliennes notamment avec des chercheurs avec lesquels j'ai déjà pu partager une forte expérience amazonienne.

Le projet s'appuie notamment une active coopération avec :

- le département de géographie de l'Université de Cuiaba (UFMT) : c'est, « historiquement », l'équipe avec laquelle nous travaillons depuis le plus longtemps en Amazonie notamment lors du programme CAPES-COFECUB 95-6 : 2 thèses ont été réalisées dans le cadre de cette collaboration (M.Clairay et C.Zamparoni).
- le Centre de Développement Durable (CDS, dirigé par M.Bursztyrn) de l'Université de Brasilia : thèse en cotutelle de V.Nédélec ;
- L'INPA de Manaus : thèse en cotutelle en cours de M.Battista Franca.
- D'autres institutions ou universités comme l'INPE de São Jose dos Campos, l'UFPR de Curitiba, l'Université de São Paulo, l'UNESP de Presidente Prudente, etc...

Quel avenir pour le Mato Grosso et l'Amazonie ?

Le modèle de développement décrit pour le Mato Grosso reste fragile, dépendant des cours mondiaux et de conditions de production et de rentabilité (notamment pour le soja) dont la durabilité est loin d'être garantie. Une région dépendante des cours mondiaux mais aussi du cœur économique pauliste comme l'illustre la distribution électrique : « *au lieu du projet initial reposant sur l'exploitation du potentiel énergétique local, la dynamique d'interconnexion poussée à l'extrême fait basculer l'ensemble du marché du front pionnier sur le réseau interconnecté Sul-Sudeste* » (de Gouvello, 1999). En clair, la plupart des décisions qui affectent aujourd'hui cet Etat sont prises en dehors de son vaste territoire, encore que des choix politiques locaux peuvent favoriser les dynamiques actuelles. Sur le plan social, les conflits pour la terre restent nombreux même si la pénurie qui guette maintenant cette région tend à pousser plus loin (Para, Amazonas) les tensions les plus fortes ; il reste cependant beaucoup de situations foncières à régulariser et l'attrait d'activités illégales demeure bien présent (Machado, 1998).

Surtout, dans la course entre protection de l'environnement et mise en valeur économique à outrance, la cause semble entendue dans cette région, surtout au rythme auquel s'enchaînent brûlis et défrichements depuis ces dernières années. J. Tricart, en 1992, remarquait que « *sur 29 types de formations végétales inventoriées en Amazonie, seulement 18 se trouvent dans des réserves officielles. Sur les 112 écosystèmes identifiés en Amazonie Légale, seulement 38 jouissent d'une certaine protection, soit 34%.* ». A la fin des années 1990, les réserves naturelles (où aucune activité humaine n'est autorisée, ce qui n'est bien sur pas le cas dans les réserves indigènes) ne représentaient que 3,78% de la forêt amazonienne brésilienne (151503 km² sur 4 millions, d'après Metzger 2001). Certes, on doit au Gouvernement de Fernando Henrique Cardoso d'avoir élevé à 1575000 km² (dont 1040000 km² pour les Terres Indigènes et 640000 km² pour les Unités de Conservation, certaines zones

disposant du double statut), les zones protégées légalement contre la déforestation. Mais, « si près de 32% de l'Amazonie sont aujourd'hui protégés et 15% déjà déboisés, il reste encore de vastes zones, en particulier dans les Etats d'Amazonas et du Para, au cœur de la forêt, dont le destin n'est pas défini » (Le Tourneau, 2004). Face à ce mouvement de fond, les activités de reboisements en espèces commerciales (teck) ou en eucalyptus pour la fourniture de pâte à papier (Droulers & de Andrade, 2000) restent dérisoires. Le sort de l'Amazonie, n'en déplaît pas aux Brésiliens jalousement attachés à leur indépendance et leur intégrité territoriale, continue donc légitimement d'alimenter des craintes au niveau global : les brûlis représentent actuellement 26% des émissions de gaz à effet de serre et la déforestation dans les pays tropicaux contribuerait pour un quart des émissions annuelles en CO² issues des combustibles fossiles (Pomel & Salomon, 1998). Plusieurs études (Potter et al., 2001) ont par ailleurs montré l'importance de certaines forêts primaires amazoniennes pour l'absorption du carbone.

« La marche vers l'ouest a consommé un grand écosystème à chaque décennie, les cerrados dans les années 1970, les aires de transition dans les années 1980, la forêt dans les années 1990 où elle a nettement progressé » (Théry & de Mello, 2003). Et au premier rang de ces dernières régions, l'Etat du Mato Grosso : si celui-ci est l'avenir de l'Amazonie, on est alors en droit de formuler quelques inquiétudes !

Bibliographie

- ALBALADEJO C., 2001 : A la recherche d'une agriculture « durable » sur les fronts pionniers : les processus de sédentarisation d'une agriculture familiale en Amazonie et en Argentine. *Natures, Sciences, Sociétés*. Vol.9, n°2, pp.29-43
- ALENCAR A.A.C, SOLORZANO L.A., NEPSTAD D.C., 2004 : Modeling forest understory fires in an eastern amazonian landscape. *Ecological Applications*, 14(4) Supplement, pp.139–149
- ACHARD F., EVA H., MAYAUX P., 2001: Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data: production and accuracy assessment issues. *International Journal of Remote Sensing*, vol.22, n°14, pp.2741-2762
- ALBALADEJO C., TULET J.C., (dir.), 1996: *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques latines, Paris, 358p.
- ALVES D.S., MEIRA FILHO L.G., D'ALGE J.C.L., MELLO E.K., DE MOREIRA J.C., MEDEIROS J.S., 1992 : The Amazonia information system. *Proceedings of the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, Washington, pp.259-266
- ANDERSEN L.E., REIS E.J., 1997 : *Deforestation, development and government policy in the Brazilian Amazon : an econometric analysis*. IPEA-NEMESIS, n°513, Rio de Janeiro, 28 pages
- ANGELIS de C.F., MAC GREGOR G.R., KIDD C., 2004 : A 3 year climatology of rainfall characteristics over tropical and subtropical South America based on tropical rainfall measuring mission precipitation radar data. *International Journal of Climatology*, vol.24, n°3, pp.385-399
- 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
- ARNAUD DE SARTRE X., 2003 : *Territorialités contradictoires des jeunes ruraux amazoniens : mobilités paysannes ou sédentarités professionnelles ?* Thèse de Doctorat en Etudes Rurales de l'Université de Toulouse le Mirail et de l'Université Fédérale du Para à Belem, Brésil, 544 pages
- ARVOR D., 2005 : *Apports des images NDVI du satellite SPOT-vgt à l'étude de l'impact des précipitations sur les rendements de soja au Mato Grosso (Brésil)*. Mémoire de Master recherche de l'Université Rennes 2, 129 pages
- ASNER G.P., 2001 : Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. . *International Journal of Remote Sensing*, vol.22, n°18, pp.3855-3862
- ATKINSON P.M., CUTLER M.E.J., LEWIS H., 1997 : Mapping sub-pixel proportional land cover with AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol.18, n°4, pp.917-935
- AUBERTIN C., 1990 : Mouvements de populations et changements économiques dans le Centre Ouest brésilien, in *cahier ORSTOM, série Sciences Humaines*, Volume 26, n°3, pp.327-342.
- AUBREVILLE A., 1961 : *Etude écologique des principales formations végétales du Brésil*. Centre technique forestier tropical, Nogent sur Marne, 269 pages
- BADER J.M., FORBES G.S., GRANT J.R., LILLEY R.B.E., WATERS A.J., 1995: *Images in weather forecasting : a practical guide for interpreting satellite and radar imagery*. Cambridge University Press, 499 pages
- BARBOSA R.I., XAUD M.R., SILVA G.N.F., CATTANEO A.C., 2003 : Forest fires in Roraima, Brazilian Amazonia. *International Forest Fire News*, n°28, pp.51-56
- BARIOU R., 1978 : *Manuel de télédétection*. Sodipe S. A. ; Paris; 349 pages.
- BARIOU R., DOS PASSOS M.M., CLAIRAY M., 1996 : Aspects de la colonisation agricole dans le Mato Grosso (Brésil). *Photo Interpretation*, Volume 34, pp.105-107.
- BARIOU R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985 : *Albédo Réflectance*. Presses Universitaires de Rennes 2 ; "Dossiers de télédétection"; 121 pages.
- BARIOU R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985 : *Indices de végétation*. Presses Universitaires de Rennes 2 ; "Dossiers de télédétection"; 121 pages.
- BARIOU R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985 : *Réponse spectrale des végétaux*. Presses Universitaires de Rennes 2 ; "Dossiers de télédétection"; 92 pages.
- BARRETT E. C., 1974 : *Climatology from satellites*. Methuen & Co Ltd, Londres, 418 pages

- BASTOS LAGE L., 1993 : *Analyse de la déforestation par télédétection spatiale dans l'Etat du Rondônia (Brésil)* ; Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 144 pages
- BATISTA G.T., TUCKER C.J., 1994 : Assesment of AVHRR data for deforestation estimation in Mato Grosso (Amazonian Basin), *Remote Sensing Reviews* ; 10 ; pp.35-49
- BATISTELLA M., ROBESON S., MORAN E.F., 2003 : Settlement design, forest fragmentation, and landscape change in Rondônia, Amazônia. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.69, n°7, pp.805-812
- BAUELLE G., REGNAULD H., 2004 : *Echelles et temporalités en géographie*. SEDES, DIEM, Paris, 174 pages
- BECKER B.K., 1986 : Signification actuelle de la frontière : une interprétation géopolitique à partir du cas de l'Amazonie brésilienne. *Cahier des Sciences Humaines*, 22 (3-4), pp.297-317
- BECKER B., (coord.) 1990 : *Fronteira Amazônica*. Editora Universidade de Brasília e Editora Universidade de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 219 pages
- BECKER B.K., EGLER C.A.G., 1997 : Amazonie : méthodologie et enjeux du zonage écologique et économique. *Cahiers des Amériques latines*, n°24, pp.93-106
- BECKER B., 2001 : Sintese do processo de ocupação da Amazônia. Lições do passado e desafios do presente. In « *Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia* » Ministerio do Meio Ambiente, Brasilia, pp.5-28
- BECKER B., 2001 : La dimension géopolitique du processus d'occupation de l'Amazonie brésilienne; in "*Le mercure en Amazonie: rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires*" dir. Carmouze J.P., Lucote M., Boudou A., Paris, IRD Editions, pp.447-472
- 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
- BELTRANDO G., 2004 : *Les climats : processus, variabilité et risques*. A.Colin, Coll.U, Paris, 261 pages
- BELWARD A.S., LAMBIN E., 1990 : Limitations to the identification of spatial structures from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.11, n°5; pp.921-927
- BELWARD A.S., KENNEDY P.J., GREGOIRE J.M., 1994 : The limitations and potential of AVHRR GAC data for continental scale fire studies. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.15, n°11; pp.3595-3609
- BERGES J.C., 2003 : Neural networks and tree classifiers: an application to rainfall estimation. *Actes du colloque IGARSS 2003*, Toulouse. Publ. CD-ROM, 4 pages
- BERGES J.C., CHOPIN F., 2004 : Satellite rainfall esimation using a feed forward network : improvement and limitation. *Actes du colloque ICCP 2004*, Bologna. Publ. CD-ROM, 4 pages
- BERTRAND J.P. 2004 : L'avancée fulgurante du complexe soja dans le Mato Grosso : facteurs clés et limites prévisibles. *Revue Tiers Monde*, Paris, pp.567-594
- BESANCENOT J.P., 1995 : *Climat, pollution atmosphérique, santé. Hommage à Gisèle Escourrou*, Dijon, GDR Climat et Santé, 243 pages
- BETTS R.A., COX P.M., et al., 2004 : The role of ecosystem –atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.157-175
- 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
- BIGOT S., 2004 : *Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales : l'exemple de la Côte d'Ivoire*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'USTL, Lille, 398 pages
- BOBROFF, S. A., 1994 : *Occupation du Sol et Evolution Urbaine par Télédétection: Application au Cas de Londrina/Brésil*. Mémoire de D.E.A. de Géographie. COSTEL, Université Rennes II. 48 pages
- BONAUDO T., BOMMEL P. et TOURRAND J.-F., 2005 : Modélisation des fronts pionniers de la Transamazonienne. Communication présentée lors de la *Joint conference on Multi-Agent Modeling for Environment management*, CABM-HEMA-SMAGET 2005, 21-25 mars 2005, Bourg Saint-Maurice, 21pages

- BONN F., ROCHON G., 1992: *Précis de télédétection, volume 1: principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec, AUPELF-UREF, 485 pages
- BONNARDOT, V., CAREY, V., PLANCHON, O. & CAUTENET, S., 2001. Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area. *Wynboer*, 147, pp.10-14
- BOWMAN I., 1931 : *The pioneer fringe*. American geographical Society, n°13, New-York
- BRET B., 1977 : L'agriculture au Brésil, expansion agricole et crise agraire. *Problèmes d'Amérique Latine*, n°44, pp.65-84
- BROWN J.C., JEPSON W., PRICE K.P., 2004 : Expansion of mechanized agriculture and land-cover change in Southern Rondônia, Brazil. *Journal of Latin American Geography*, Vol.3, n°1, pp.96-102
- BRUNET R., 1996 (dir.) : *Les mots de la géographie*, Belin-Reclus, 518 pages
- BURROUGHS W.J., 1991 : *Watching the world's weather*. Cambridge University Press, 196 pages
- BURSZTYN M. et BARTHOLO J. R., 1999 : *Amazônia Sustentável: uma estratégia de desenvolvimento Rondônia 2020*. ed. IBAMA/CDS: IBAMA, Brasília, 247 p.
- BURSZTYN M., SAYAGO D. A. V. et TOURRAND J.-F. (coord.), 2003 : *Amazônia: cenas e cenários*, Editora Universidade de Brasília, 1^a edição, Brasília, 380 p.
- CADET D., GUILLOT B., 1991 : EPSAT: *Estimation des Pluies par Satellite*. ORSTOM Editeur, 63 pages
- CALVET J.C. et al., 1997 : Mapping surface parameters for mesoscale modeling in forested and deforested Southwestern Amazonia ; *Bulletin of the American Meteorological Society* ; 78-3 ; pp.413-423
- CANEVET C., 1992: *Le modèle agricole breton. Histoire et géographie d'une révolution agro-alimentaire*. Presses Universitaires de Rennes 2, 397 pages
- CANTAT O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Noréis*, n°191, pp.75-104
- CARDILLE J.A., FOLEY J.A., 2003 : Agricultural land-use change in Brazilian Amazonia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. *Remote Sensing of Environment* 87, pp.551-562
- CARREGA P., 1992 : *Topoclimatologie et habitat*. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Nice, et numéros 35-36 de la Revue d'Analyse Spatiale (1994)
- CARREGA P., DUBREUIL V., RICHARD Y., 2004 : Climat et développement durable ; *Historiens et Géographes*, 387, pp.205-209
- CARREIRAS J.M.B., SHIMABUKURO Y.E., PEREIRA J.M.C., 2002 : Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, vol.23, n°23, pp.4979-4983
- CARVALHO G., MOUTINHO P., NEPSTAD D., MATTOS L., SANTILLI M., 2004 : An Amazon perspective on the forest-climate connection : opportunity for climate mitigation, conservation and development ? *Environment, Development and Sustainability*, 6 (1-2), pp.163-174
- CARVALHO S., TOURRAND J.-F., 2000 : A produção leiteira na Transamazônica. In Veiga & Tourrand (eds), 2000 : *Produção leiteira na Amazônia oriental. Situação atual e perspectivas*. Editions Embrapa Amazônia oriental, Belém, 2000, pp. 81-90
- CASTRO S.P. et al., 1990 : A Colonização Oficial em Mato Grosso: a nata e a borra da Sociedade. *Cadernos do NERU*. Cuiabá, EdUFMT.
- CAUDURO DIAS DE PAIVA E.M., CLARKE R.T., 1995 : Time trends in rainfall records in Amazonia ; *Bulletin of the American Meteorological Society* ; 76-11 ; pp.2203-2209
- CAUTENET G., GUILLARD F., MARTICORENA B., BERGAMETTI G., DULAC F., EDY J., 2000: Modeling a Saharan dust event, *Meteorologische Zeitschrift*, 9, pp.221-230.
- CAUTENET S., POULET D., DELON C., DELMAS R., GREGOIRE J.M., PEREIRA J.M., CHERCHALI S., AMRAM O., FLOUZAT G., 1999: Simulation of carbon monoxide redistribution over Central Africa during biomass burning events (EXPRESSO), *Journal of Geophysical Research*, 104 (D23, 30), pp.641-657.
- CHARABI Y., 2001 : *L'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université Lille 1, 247 pages
- CHARRE J., 1981 : Les contraintes climatiques de l'organisation de l'espace: définition et classification. *T.I.G.R.*, n°45-46; pp.3-12

- CHEN X., 2002 : Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, vol.23, n°1, pp.107-124
- CHERCHALI S., AMRAM O., FLOUZAT G., 2000 : Retrieval of temporal profiles of reflectances from simulated and real NOAA-AVHRR data over heterogeneous landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, vol.21, n°4, pp.753-775
- CHU P.S., YU Z.P., HASTENRATH S., 1994 : Detecting climate change concurrent with deforestation in the Amazon Basin: which way has it gone? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75-4, pp.579-583
- CHUVIECO E., MARTIN M.P., 1994 : Global fire mapping and fire danger : estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol.60, n°5, pp.563-570
- CLAIRAY M., 2003 : *Etude par télédétection des structures spatiales du front pionniers dans le nord du Mato Grosso*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université Rennes 2, 320 pages
- CLAIRAY M., 2005 : Structures, composantes et formes spatiales d'un front pionnier situé au Mato Grosso, Brésil. *M@ppemonde*, 77, <http://mappemonde.mgm.fr/num5/articles/art05102.html>, 7 pages
- CLAIRAY M., DUBREUIL V., 2002 : Etude de l'évolution diachronique de la Gleba Celeste (Mato Grosso) à partir d'images Landsat ; *Espaço & Geografia : geoprocessamento*, Universidade de Brasilia, Vol.5, n°1, pp.119-138
- CLARK T.L., FARLEY R.D., 1984 : Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting: A possible mechanism for gustiness. *Journal of Atmospheric Science*, 41, pp.329 – 350.
- CORGNE S., 2004 : *Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université Rennes 2, 225 pages
- COTTON, W.R., THOMPSON, G. & MIELKE, P.W., 1994. Real-time mesoscale prediction on workstations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol.75, n°3, pp.349-362
- COTTON W.R., PIELKE R.A., WALKO R.L., et al., 2003 : Rams 2001: Current status and future directions. *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol.82, pp.5-29
- COUTINHO L.M., 1990 : O cerrado e a Ecologia do Fogo. *Ciência Hoje* Vol.12 n°68. pp.22-30.
- COY M., 1986 : Développement régional à la périphérie amazonienne. *Cahiers des Sciences Humaines*, vol.22, n°3-4, pp.371-388
- COY M., 1987 : *Pionierfront und Sdatenentwicklung Social und Wirtschaftspräimeliche Differenzierung der Pionierstädte in Nord-Mato Grosso (Brasilien)*. Universität von Tübingen, 133 pages
- COY M., 1996 : Différenciation et transformation de l'espace au Nord du Mato Grosso. Contribution à un modèle dynamique des fronts pionniers en Amazonie brésilienne. in *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques latines, Paris, pp.103-127
- CUTRIM E., MARTIN D.W., RABIN R., 1995 : Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia, *Bulletin of the American Meteorological Society* ; 76-10 ; pp.1801-1805
- DALE V.H., O'NEILL R.V., PEDLOWSKI M., SOUTHWORTH F., 1993 : Causes and effects of land-use change in Central Rondônia, Brazil. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59-6, pp.997-1005
- DANTAS O., GERALDINI M., 1997 : Veranico: estudos preliminares na região de Dourados; *Boletim Climatologico*, UNESP-2-3, pp. 142-145
- DE CASTRO N., 2002 : Infra-estrutura de transporte e expansão da agropecuária brasileira. *planejamento e políticas públicas*, n°25, pp.106-138
- DEFFONTAINES P., 1936 : Pays et paysages de l'Etat de Saint-Paul. *Annales de Géographie*, vol.45, pp.50-74
- DEMANGEON A., 1932 : Pionniers et fronts de colonisation. *Annales de Géographie*, vol.41, pp.631-636
- DEMANGEOT J., 1972 : *Le continent brésilien*. SEDES, Paris, 172 pages
- DEMANGEOT J., 1999 : *Tropicalité, géographie physique intertropicale*. A.Colin, coll.U, Paris, 340 pages

- DEMPSTER A. P., 1968 : A generalisation of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society*, pp. 205-247.
- DI MAIO MANTOVANI A.C., SETZER A.W., 1997 : Deforestation detection in the Amazon with an AVHRR-based system. *Int.J.Remote Sensing*, 18-2. pp.273-286
- DIALLO O., DIOUF A., HANAN N.P., NDIAYE A., PREVOST Y., 1991 : AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.12, n°6; pp.1259-1279
- DIAS L., RAUD C., 2000 : *Villes et régions du Brésil*. L'Harmattan, Paris, 218 pages
- DIAS M.A.F.S., REGNIER P., 1996: Simulation of mesoscale circulations in a deforested area of Rondônia in the dry season, in « *Amazonian deforestation and climate* », Ed. by Gash, Nobre, Roberts & Victoria, Wiley, pp.531-547.
- DOMINGO J., GAUTHIER A., 1988 : *Le Brésil, puissance et faiblesse d'un géant du Tiers Monde*, Bréal, Paris, 204 pages
- DOS PASSOS M.M., 1998 : *Amazonia: Teledeteção e colonização*. Edit UNESP, SP, 157 pages
- DOS SANTOS LEITE P., 2002 : Uso do sensoriamento remoto e SIG no monitoramento e licenciamento ambiental de propriedades rurais em Mato Grosso. In Actes du workshop « *Aplicações do sensoriamento remoto e SIG no monitoramento e controle do desmatamento na Amazônia brasileira* », Brasília, avril 2002, pp.43-58
- DOS SANTOS M.A., 1999 : Processo de ocupação da Amazônia : reflexos na qualidade de vida expressos pelos indicadores de saúde e Ambiente. In *Saúde e ambiente na região Amazônica*, Ed. UFMT, Cuiaba, pp.137-144
- DROULERS M., 1995 : *L'Amazonie*. Nathan, Paris, 188 pages
- DROULERS M., 1999 : Frontières au Brésil: changement de sens. *BAGF*, n°3, pp.250-259
- DROULERS M., 2001 : *Brésil: une géohistoire*. PUF, coll. Géographies, Paris, 306 pages
- DROULERS M., 2004 : *L'Amazonie, vers un développement durable*. A.Colin, coll.U, Paris, 219 pages
- DROULERS M., ANDRADE de C., 2000 : Papier, nouveau secteur d'exportation brésilien. *L'Information géographique*. Vol.64, n°3, pp.262-264
- DROULERS M., LE TOURNEAU F.M., 2000 : Amazonie : la fin d'une frontière ? *Caravelle*, n°75, pp.109-135
- DROULERS M., LE TOURNEAU F.M., 2001 : La colonisation agricole en Roraima: anciennes configurations et nouvelles stratégies. *Annales de géographie*, n°621, pp.550-570
- D'SOUZA G., BELWARD A.S., MALINGREAU J.P., 1996: *Advances in the use of NOAA-AVHRR data for land applications*. Kluwer Academic Publishers, 479pages
- 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
- DUBREUIL V. MARCHAND J.P., 1997 : *Le climat, l'eau et les hommes*. P.U.Rennes, 333 pages
- DUBREUIL V., REGNAULD H., 1997 : Les paysages de la France : la part de la nature sous le regard du satellite NOAA ; *Mappemonde*, 1997-2, p.24-28
- 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 ; 279p
- DURIEUX L., MACHADO L.A.T., LAURENT H., 2003 : The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. *Remote Sensing of Environment*, n°86, pp.132-140
- EGLIN J. et THERY H., 1982 : *Le pillage de l'Amazonie*, Librairie François Maspero, Petit collection, Maspero n° 266, Paris, 208 p.
- EHRlich D., LAMBIN E.F., 1996 : Broad scale land-cover classification and interannual climatic variability. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.17, n°5; pp.845-862
- ENGLE F.C., Deforestation and development in Brazil's Amazon Basin. *Geocarto International*, vol.15, n°1, pp.83-86
- EASTMAN R.J., 1997 : *Idrisi for Windows User's guide*, version 2.0, Worcester, Idrisi Project, Clark University

- E.R. 30 , sous la direction de C.P. PEGUY, 1981: "*Dix ans de carte climatique détaillée de la France au 1/250.000e.*"; in "*Eaux et climats : Mélanges offerts à C.P. PEGUY* ; Grenoble; pp. 41-84
- ESCOURROU G., 1991 : *Le climat et la ville*. Nathan, coll. Géographie d'aujourd'hui ; 191 pages
- EVA H.D.G., GLINNI A., JANVIER P., BLAIR-MYERS C., 1999 : Vegetation map os South America, scale 1/5M. *TREES publications series D2*, Luxembourg, European Commission
- F.A.O., 1996 : *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change process*. FAO forestry paper n°130, Rome, 154 pages
<http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm#TOC>
- FEARNSIDE P.M., 1991 : Développement agricole et déforestation en Amazonie brésilienne. *Cahiers des Sciences Humaines*, 27 (1-2), pp.235-253
- FEARNSIDE P.M., 2002 : Contrôle de desmatamento em Mato Grosso : um novo modelo para reduzir a velocidade de perda de floresta Amazônica. In Actes du workshop « *Aplicações do sensoriamento remoto e SIG no monitoramento e controle do desmatamento na Amazônia brasileira* », Brasília, avril 2002, pp.29-43
- FEARNSIDE P.M., 2003 : Deforestation control in Mato Grosso : a new model for slowing the loss of Brazil's Amazon forest. *Ambio*, vol.32, n°5, pp.343-345
- FEARNSIDE P.M., 2005 : Deforestation in Brazilian Amazonia : history, rates and consequences. *Conservation Biology*, vol.19, n°3, pp.680-688
- FEMA, 1998 : *Queimadas : Legislação*. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Cuiabá.
- 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
- FERREIRA, J.C.V., 2001 : *Mato Grosso e seus Municípios*. 19a ed. Cuiabá, SEC/MT, 660 pages
- FERREIRA N.J., GURGEL H., 2002 : Variabilidade dos ciclos anual e interanual da radiação de ondas longas emergentes sobre a América do Sul e vizinhanças. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n°3, pp.440-444
- FISCH G., TOTA J., MACHADO L.A.T., 2004 : The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.47-59
- FISHER P., 1997 : The pixel : a snare and a delusion. *International Journal of Remote Sensing*, vol.18, n°3, pp.679-685
- FLASKERUD G., 2003 : Brazil's soybean production and impact. *Extension Bulletin*, North Dakota State University, 16 pages, www.ag.ndsu.nodak.edu
- FLASSE S.P., CECCATO P., 1996 : A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal of Remote Sensing*, vol.17, n°2, pp.419-424
- FLEURY M.F., 2000 : L'exploitation du bois et la déforestation: l'exemple du Brésil. *L'Information Géographique*, vol.64, n°1, pp.58-70
- FOODY G.M., CURRAN P.J., 1994 : *Environmental remote sensing from regional to global scales*. John Wiley & Sons, 238 pages
- FOUCHER M., 1974 : La mise en valeur de l'Amazonie brésilienne. *Problèmes d'Amérique Latine*, n°33, pp.71-90
- FOUCHER M., 1991 : *Fronts et frontières: un tour du monde géopolitique*. 2^e édition, Fayard, Paris, 691 pages
- FOUCHER M., 1977 : Actualités amazoniennes. *BAGF*, n°442, pp.125-132
- FROHN R.C., MAC GWIRE K.C., DALE V.H., ESTES J.E., 1996 : Using satellite remote sensing analysis to evaluate a socio-economic and ecological model of deforestation in Rondônia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, vol.17, n°16, pp.3233-3255
- FU R., LI W., 2004 : The influence of the land surface on the transition from dry to wet season in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.97-110
- FUJISAKA S., BELL W., THOMAS N., HURTADO L., CRAWFORD E., 1996 : Slash and burn agriculture, conversion to pasture, and deforestation in two Brazilian Amazon colonies. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 59, pp.115-130
- GANDU A.W., COHEN J.C.P., de SOUZA J.R.S., 2004 : Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.123-135

- GAO B.C., 2000 : A practical method for simulating AVHRR-consistent NDVI data series using narrow MODIS channels in the 0.5-1.0um spectral range. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 38, n°4, 1969-1975
- GARRATT J.R., 1993 : Sensivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments-A review. *Journal of Climate*, 6, pp.419-449
- GARREAUD R. D., WALLACE J.M., 1998 : Summertime incursions of mid-latitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, 126, pp.2713-2733.
- GASH J.H.C., NOBRE C.A., ROBERTS J.M., VICTORIA R.L., (dir.) 1996 : *Amazonian deforestation and climate*. John Wiley, Chichester-UK, 611 pages
- GEIST H.J., LAMBIN E.F., 2002 : Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, vol.52, n°2, pp.143-158
- GEORGES P., 1995 : *Dictionnaire de la géographie*. PUF, Paris, 498 pages
- GIRARD M.C., GIRARD C.M., 1989 : *Téledétection appliquée : zones tempérées et intertropicales*. Masson, collection Sciences agronomiques ; Paris; 260 pages.
- GOND V., FONTES J., LOUDJANI P., 1997 : Dynamique des biomes africains par l'analyse de séries temporelles satellitales. *C.R.Acad.Sci.*, Paris, n°320, pp.179-188
- GOUËSET V., 2002 : *Villes, société et action publique en Amérique latine : étude de géographie comparée (Colombie, Argentine, Mexique)*. Dossier pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Rennes 2, 266 pages + Annexes
- GOUVELLO de C., 1996 : Problématique énergétique et modes d'occupation de l'espace pionnier sud amazonien : l'extrême nord de l'Etat de Mato Grosso. in *Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne*. L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques latines, Paris, pp.159-188
- GOUVELLO de C., 1999 : Approvisionnement énergétique et spécialisation agricole des régions pionnières : l'Amazonie méridionale. *L'Espace géographique*. n°3, pp.257-268
- GOWARD S.N., MARKHAM B., DYE D.G., DULANEY W., YANG J., 1991 : Normalized difference vegetation index from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, n°35; pp.257-277
- GRAFFIN A., ASSUMPCÃO J.V.L., 2001 : *II encontro do comitê Científico Consultivo do « Projeto de reflorestamento para seqüestro de carbono »*. Document de travail, ONF-Brasil, PSA, Pro-Natura, 16 pages + annexes
- GRECO S. et al., 1990 : Rainfall and surface kinematic conditions over central Amazonia during ABLE 2B. *Journal of Geophysical Research*, 95, pp.17001-17014
- GREGOIRE J.M., BELWARD A.S., KENNEDY P., Dynamiques de saturation du signal dans la bande 3 du senseur AVHRR : handicap majeur ou source d'information pour la surveillance de l'environnement en milieu soudano-guinéen de l'Afrique de l'Ouest ? *International Journal of Remote Sensing*, Vol.14, n°11; pp.2079-2095
- GRENAND P., 1996 : L'espace indigène face au front pionnier au Brésil. In *"Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne"*, L'Harmattan, coll. Recherche et documents Amériques latines, Paris, pp.191-205
- 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
- GUIMARÃES N., REGINA B., 1996 : *A Lenda do Ouro Verde*. Dissertação de Mestrado UNICAMP
- GURGEL H.C., FERREIRA N.J., 2003 : Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.24, n°18; pp.3595-3609
- GURNEY R.J., FOSTER J.L., PARKINSON C.L., 1993 : *Atlas of satellite observations related to global change*. Cambridge University Press, 470 pages
- GUTMAN G., 1987 : The derivation of vegetation indices from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.8, n°8; pp.1235-1243
- GUTMAN GARIK G., 1991 : Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, n°35; pp.121-136
- GUTMAN G., IGNATOV A., 1995 : Global land monitoring from AVHRR : potentiel and limitations. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.16, n°13; pp.2301-2309
- GUYOT G., 1984 : Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge: application à la télédétection. *Bulletin S.F.P.T.* n°95; pp.5-17

- GUYOT G., 1989 : *Signature spectrales des surfaces naturelles*. Paradigme ,Caen, Collection Télédétection satellitaire; 178 pages
- HARRIS P.P., HUNTINGFORD C., GASH J.H.C., et al., 2004 : Calibration of a land-surface model using data from primary forest sites in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.27-45
- HAYES D.J., SADER S.A., 2001 : Comparison of change-detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.67, n°9, pp.1067-1075
- HELMER E.H., 2004 : Forest conservation and land development in Puerto Rico. *Landscape Ecology*, 19 (1), pp.29-40
- 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
- HERODOTE, 2000 : *Nation Brésil*. Paris, n°98, 202 pages
- HIEZ G. et al., 1992 : Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la pluviométrie annuelle du bassin amazonien ; *Veille climatique satellitaire* ; 43, pp.39-52
- HOCK J.C., 1984 : Monitoring environmental resources through NOAA's polar orbiting satellites. *I.T.C. journal*, n°4; pp.263-268
- HOTYAT M., ARNOULD P., SIMON L., 1997 : *Les forêts d'Europe*. Paris, Nathan, 413 pages
- HOUGHTON R.A., 1999 : The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use. *Tellus, Chemical and Physical Meteorology*, 51 (2), pp.298-313
- HU B., LUCHT W., STRAHLER A.H., SCHAAF C.B., SMITH M., 2000 : Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. *Remote Sensing of Environment*, n°71; pp.119-132
- HUBERT-MOY L., QUÊTÉ Y., BILLOT M., CORGNE S., 2001 : Trajectories of Land-cover-change in intensive agricultural regions : a short-time predictive approach with the Dempster-Shafer theory. *Proceedings of the First International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, World Scientific Co. Pte. Ltd, vol.2, pp. 403-414.
- HUBERT-MOY L., 2004 : *Occupation du sol et télédétection : de l'inventaire à la modélisation prédictive*. Mémoire de HDR, Université Rennes 2, 327 pages + Annexes
- HUETE A.R., RATANA P., SHIMOBUKURO Y.E., 2005 : Remotely-Sensed Carbon and Water Variations in Natural and Converted Ecosystems with Time Series MODIS Data. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, pp.573-578.
- HUFTY A., 2001 : *Introduction à la climatologie*. De Boeck Université, Québec, 542 pages
- HUNTINGFORD C., HARRIS P.P., et al., 2004 : Using a GCM analogue model to investigate the potential for Amazonian forest dieback. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.177-185
- IBGE 1997 : *Contagem da População – 1996*. Rio de Janeiro, vol. 1
- IBGE, 1996. *Censo Agropecuário – 1995/96*. Rio de Janeiro
- IBGE, *statistiques municipales* : www.sidra.ibge.gov.br
- INPE, 1996, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, *PRODES: deforestation* Project Meeting, Sao Jose dos Campos
- ICHII K., MARUYAMA M., YAMAGUCHI Y., 2003 : Multi-temporal analysis of deforestation in Rondônia state in Brazil using Landsat MSS, TM, ETM+ and NOAA-AVHRR imagery and its relationship to changes in the hydrological environment. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.24, n°22; pp.4467-4479
- IMBERNON J., 1999 : A comparison of the driving forces behind deforestation in Peruvian and the Brazilian Amazon. *Ambio*, vol.28, n°6, pp.509-513
- IMBERNON J., 2000 : Déforestation et pression démographique au Rondônia, Brésil. *Bois et forêts des tropiques*, n° 266 (4), 2000, pp. 23-33.
- IMBERNON J., BRANTHOMME A., 2001 : Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol.22, n°9, pp.1753-1765
- JALLET A., 2002 : *Variabilité spatio-temporelle des températures maximales de brillance au Mato Grosso, Brésil*. Mémoire de DEA de géographie de l'Université Rennes 2 ; 109 pages

- JASINSKI M.F., 1990 : Sensitivity of the normalized difference vegetation index to subpixel canopy cover, soil albedo, and pixel scale. *Remote Sensing of Environment*, n°32; pp.169-187
- 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
- KAIMOWITZ D., ANGELSEN A., 1998 : *Economic models of tropical deforestation : a review*. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonésie, 139 pages
- KERGOMARD C., 2004 : Réflexions sur trente années d'usage de la télédétection satellitale en climatologie ; *Actes du XVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Caen, pp.55-58
- KRUG T., 2001 : O quadro do desflorestamento da Amazônia. In «*Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia* » Ministerio do Meio Ambiente, Brasilia, pp.91-99
- KOGAN F.N., 1990 : Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.11, n°8; pp.1405-1419
- LABORDE J.P., 2004 : Exemple de cartographie d'une variable continue connue de façon discrète mais également liée à des champs de variables connues de façon continue : cas de la cartographie des pluies médianes de décembre sur l'Algérie du Nord. In «*La représentation spatiale des variables climatiques* », *Actes des journées de climatologie de Nancy de mars 2004* ; sous la direction de P.Carrega et L.Wahl, pp.13-32
- LAMARRE D., PAGNEY P., 1999 : *Climats et sociétés*. A.Colin, 272 pages
- LAMARRE D., 2002 : Ambiguïtés tropicales. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Vol.79, n°4, pp.450-461
- LAMBIN E.F., 1994 : *Modelling deforestation processes: a review*. *Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites*, TREES series B: research report n°1, Luxembourg, ECSC-EC-EAEC, 113 pages
- LAMBIN, E.F. 1997 : Modeling and Monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, Vol.21, n°3, pp. 375-393
- LAMBIN E.F., EHRLICH D., 1996 : The surface temperature vegetation index space for land cover and land cover change analysis. *Int.J.Remote Sensing*, 17-3, pp.463-487
- LAMBIN E.F., EHRLICH D., 1997 : The identification of tropical deforestation from broad spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, vol.18, n°17, pp.231-244
- LAMBIN E.F., GEIST H.J., LEPERS E., 2003 : Dynamics of Land-use and Land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* n°28, pp.205-241
- LAMBIN E.F., STRAHLER A.H., 1994 : Change-vector analysis in multitemporal space tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, n°48, pp.231-244
- LAMBIN E.F., TURNER B.L., GEIST H.J., AGBOLA S.B., 2001 : The causes of land-use and land-cover change : moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, n°11, pp.261-269
- LAPORTE N.T., GOETZ S.J., JUSTICE C.O., HEINICKE M., 1998 : A new land cover map of Central Africa derived from multi-resolution, multi-temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, n°18, pp.3537-3550
- LAQUES A.-E., 1993 : *Dynamique d'un front pionnier en domaine forestier tropical : le cas de Ticoporo (piémont des Andes vénézuéliennes)*. *Contribution de l'imagerie satellitale à la conception d'une méthode d'aide à l'aménagement*. Thèse de Doctorat de géographie, Université de Toulouse-Le Mirail. 241 p. + cartes.
- LAQUES A.E., 2003 : Paysages et modèles paysagers : des indicateurs géographiques pour l'analyse des dynamiques spatio-temporelles d'un front pionnier (le cas de São Felix do Xingu, Brésil, Etat du Para). In *Actes du colloque d'Avignon « Objets et indicateurs géographiques »* dir. J.Maby, n°5, pp.109-120
- LAURENCE W.F. et al., 1997 : Biomass collapse in Amazonian forest fragments ; *Science*, 278, pp.1117-1122
- LAURENCE W.F., 2000 : Mega-development trends in the Amazon : implications for global change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, pp.113-122

- LAURENCE W.F., COCHRANE M.A., BERGEN S., FEARNSTIDE P.M., DELAMONICA P., BARBER C., D'ANGELO S., FERNANDES T., 2001 : The future of the Brazilian Amazon. *Science*, Vol.291, pp.438-439
- LAURENCE W.F. et al., 2002 : Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of biogeography*, n°29, pp.737-748
- LBA science planning group, 1996 : *The Large scale Biosphere-Atmosphere experiment in Amazonia : concise experimental plan*. INPE-CPTEC, Cachoeira Paulista, SP Brasil, 44p.
- LEAN J., WARRILOW D.A., 1989 : Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, vol.342, pp.411-413
- LE BORGNE-DAVID A., 1996 : *Les nouvelles logiques migratoires des paysans du sud-ouest du Parana- Brésil, " Le salariat plutôt que la malaria "*. Thèse de Doctorat en Développement Rural, Université de Toulouse Le Mirail. 318 pages
- LE DEROUT M., 2004 : *Le front pionnier, un regard croisé entre synthèse épistémologique et problèmes didactiques*. Mémoire de DEA de l'Université Paris-7, 173 pages
- LEDUC F., SOLAIMAN B., CAVAYAS F., 2000 : A fuzzy and evidential approach for temporal changes interpretation in a forestry context using cartographic and satellite data. *Géomatique 2000*, Palais des Congrès, Montréal-Canada, 8-10 mars 2000.
- LE HEGARAT-MASCLE S., QUESNEY A., VIDAL-MADJAR D., TACONEY O., NORMAND M., LOUMAGNE C., 2000 : Land cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in an agricultural area in France. *International Journal Of Remote Sensing*, vol. 21, n°3, pp.435-456.
- LE HEGARAT-MASCLE S., RICHARD D., OTTLÉ C., 2003. Multiscale data fusion using Demspter-Shafer evidence theory, *Integrated Computer Aided Engineering*, vol.10, pp.9-22.
- LENA P., 1986 : Aspects de la frontière amazonienne. *Cahiers des Sciences Humaines*, vol.22, n°3-4, pp.319-343
- LENA P., 1992 : Expansion de la frontière économique, accès au marché et transformation de l'espace rural en Amazonie brésilienne, in *les Chantiers de Sciences Humaines*, Paris, ORSTOM; 28-4 ; pp.579-601
- LENA P., 1999 : La forêt amazonienne : un enjeu politique et social contemporain ; *Autrepart* ; n°9, pp.97-120
- LEPERS E., LAMBIN E.F., JANETOS A.C., et al., 2005 : A synthesis of information on rapid Land-cover change for the period 1981-2000. *BioScience*, vol.55, n°2, pp.115-128
- LE ROY LADURIE E., 1983 : *Histoire du climat depuis l'an Mil* ; Coll. Champs, Flammarion; Paris; 2 tomes, 287 et 254p.
- LE TOURNEAU F.M., 2002 : La représentation du peuplement en pays pionnier: l'Amazonie brésilienne. *L'espace géographique*, n°2002-2, pp.145-152
- LE TOURNEAU F.M., 2004 : Jusqu'au bout de la forêt ? Causes et mécanismes de la déforestation en Amazonie brésilienne. [M@ppemonde](http://mappemonde.mgm.fr/num3/art04307.html) 75 (2004-3) 12 pages
<http://mappemonde.mgm.fr/num3/art04307.html>
- LETTAU H., LETTAU K., MOLION L.C.B., 1979 : Amazonia's hydrological cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly weather reviw.* Vol.107, n°3, pp.227-238
- LEVI STRAUSS C., 1955 : *Tristes tropiques*. Plon, coll. Terre humaine, Paris, 504 pages
- LEVY J., LUSSAULT M. (dir.), 2003 : *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Belin, Paris, 1033 pages
- LIEBMANN B., KILADIS G., MARENGO J., AMBRIZZI T., GLICK J., 1999 : Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, 12, pp.1877-1891
- LINDSEY R., SIMMON R., 2004 : From forest to field : how fire is transforming the Amazon. *NASA earth observatory*. 14 pages. <http://earthobservatory.nasa.gov>
- LOMBARDO, M.A. 1989 : *A ilha de calor nas metrópoles: O caso de São Paulo*. São Paulo: Hucitec, 244 pages
- LOMBARDO, M.A., 1997 : Metodologia e técnicas de análise do clima urbano ; *Boletim Climatológico*, FCT-UNESP, 3-2, pp.36-39

- LUCAS R.M., 1996 : Integration of AVHRR and fine spatial resolution imagery for tropical forest monitoring. in D'Souza et al.(dir) "*Advances in the use of NOAA-AVHRR data for land applications*", Euro Courses, Kluwer Academic Publishers, pp.377-394
- LUNETTA R.S., ELVIDGE C.D., 1999 : *Remote sensing change detection: environmental monitoring, methods and applications*. Taylor & Francis, Londres, 318 pages
- LUPO F., REGINSTER I. and LAMBIN E.F., 2001 : Monitoring land-cover changes in West Africa with SPOT VEGETATION: Impact of natural disasters in 1998-1999, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, n°13, pp. 2633-2639.
- LYONS T.J., SMITH R.C.G., 1996 : The impact of clearing for agriculture on the surface energy budget. *International Journal of Climatology*. Vol.16, pp.551-558
- MAC CRACKEN S.D., BRONDIZIO E.S., NELSON D., MORAN E.F., SIQUEIRA A.D., RODRIGUEZ-PEDRAZA C., 1999 : Remote sensing and GIS at farm property level: demography and deforestation in the Brazilian Amazon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.65, n°11, pp.1311-1320
- MAC GREGOR G.R., NIEUWOLT S., 1998 : *Tropical climatology*, Wiley, Chichester, 339p.
- MACHADO L.A.T., LAURENT H., DESSAY N., MIRANDA I., 2004 : Seasonal and diurnal variability of convection over the Amazonia : a comparison of different vegetation types and large scale forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.61-77
- MACHADO L.O., 1998 : Les mouvements d'argent et le trafic de drogue en Amazonie brésilienne. *Autrepart*, n°8, pp.141-158
- MAGGI M., STROPPIANA D., 2002 : Advantages and drawbacks of NOAA-AVHRR and SPOT-VGT for burnt area mapping in a tropical savanna ecosystem. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 28, n°2, pp. 231-245
- MAISONGRANDE P., DUCHEMIN B., DEDIEU G., 2004 : VEGETATION/SPOT : an operational mission for the Earth monitoring, presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.25, n°1; pp.9-14
- MALL R.K., LAL M., BHATIA V.S., RATHORE L.S., SINGH R., 2004 : Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and forest meteorology*. n°121, pp.113-125
- MAITELLI G.T., WRIGHT I.R., 1996 : The climate of a riverside city in the Amazon Basin : urban-rural differences in temperature and humidity. In « *Amazonian deforestation and climate* », Ed. by Gash & al., Wiley, p.193-206
- MAITELLI G.T., 1994 : *Uma abordagem tridimensional do clima urbano em area tropical continental : o exemplo de Cuiaba-MT*, Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 204 pages
- MALINGREAU J.P., TUCKER C.J., LAPORTE N., 1989 : AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *Int.J.Remote Sensing*, 10. pp.866-867
- MARCHAND J.P., 1981 : Climatologie, science humaine ? *Informatique et sciences humaines*, n°48, pp.43-57
- MARCHAND J.P., 1985 : *Contraintes climatiques et espace géographique : le cas irlandais*. Paradigme; Caen; Thèse d'Etat; 336 pages
- MARENGO J.A., 2004 : Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.79-86
- MAS J.F., 1998 : *Suivi et analyse de la déforestation par télédétection multidates et utilisation d'un système d'information géographique: le cas du Sud-Est du Mexique*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 204 pages
- MAS J.F., 1999 : Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, vol.20, n°1, pp.139-152
- MATHER J.R., 1974 : *Climatology: fundamentals and applications*. Mac Graw Hills, New York, 412 pages
- MAYAUX P., LAMBIN E.F., 1995 : Estimation of Tropical forest area from coarse spatial resolution data : a two-step correction function for proportional errors due to spatial aggregation. *Remote Sensing of Environment*, n°53, pp.1-15
- MAYAUX P., LAMBIN E.F., 1997 : Tropical forest area measured from global land-cover classifications: inverse calibration models based on spatial textures. *Remote Sensing of Environment*, n°59, pp.29-43

- MELLO N. A. de, 2002 : *Políticas públicas territoriais na Amazônia brasileira*, thèse de doctorat de géographie soutenue à l'universidade de São Paulo et à l'Université de Paris X Nanterre, São Paulo, 359p.
- MEBDEZ P., FERREIRA C.M., GAMEIRO A.H., ALMEIDA P.N.A., 2002 : *Arroz de terras altas em Mato Grosso : evolução tecnologica e dinâmica territorial*. Documentos n°143, Embrapa, Santo Antonio de Goias, Brésil, 23 pages
- MENDEZ P., FERREIRA C.M., 2005 : Dynamiques territoriales de la culture du riz pluvial dans la région centrale du Brésil. *Cahiers Agricultures*, vol. 14, n° 1, pp.40-45
- MENDONÇA, F.A., 1995 : *O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: Proposição metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR*. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 300 pages + annexes
- MENDOZA E.H., SANTOS J.R., SANTA ROSA A.N.C., SILVA N.C., 2004 : Land use / Land Cover mapping in brazilian Amazon using neural network with ASTER/TERRA data. *XXe ISPRS Congress*, Istambul, Turquie, <<http://www.isprs.org/istambul2004/comm7/papers/24.pdf>>, 4 pages
- MERTENS B., FORNI E., LAMBIN E.F., 2001 : Prediction of the impact of logging activities on forest cover: a case study in the East province of Cameroon. *Journal of Environmental Management*, 62, pp.21-36
- MERTENS B., LAMBIN E.F., 1997 : Spatial modelling of deforestation in south Cameroon. *Applied Geography*, vol.17, n°2, pp.143-162
- MERTENS B., POCCARD-CHAPUIS R., PIKETTY M.G., LAQUES A.E. et VENTURIERI A., 2002 : Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon : the case of São Felix doXingu in South Pará. *Agricultural Economics, special issue "spatial analysis for agricultural economics : concepts, topics tools and exemple*. 45 p.
- METZGER J.P., 2001 : Effects of deforestation pattern and private nature reserves on the forest conservation in settlement areas of the Brazilian Amazon. *Biota Neotropica*, Vol.1, n°1-2, 14p. <http://www.biotaneotropica.org.br>
- METZGER J.P., 2002 : Landscape dynamics and equilibrium in areas of slash and burn agriculture with short and long fallow period. *Landscape Ecology*, 17, pp.419-431
- 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
- MIRANDA L.B.S., AMORIM L., 2001 : *Mato Grosso: Atlas geografico*. Ed. Entrelinhas, Cuiaba-MT, Brésil, 40 pages
- MONBEIG P., 1952 : *Pionniers et planteurs de Sao Paulo*. Cahiers de la Fondation Nationale des Sciences Politiques, A. Colin, Paris, 374 p.
- 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
- MONTEIRO, C.A.F. 1976 : *Teoria e clima urbano*. Departamento de Geografia. FFLCH/USP. Tese de Livre-Docência. São Paulo, 180 pages
- MONTEIRO, C.A.F. 1992 : A interação homem-natureza no futuro da cidade. *Geosul*, v.7, n°14, pp.7-48.
- MORAN E.F., 1993 : Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. *Human Ecology*, 21, pp.1-21
- MOREIRA M.A., 2003 : *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Ed.Fed.Viçosa, 2° édition, 307 pages
- MORENO G., 1993 : *Os (Des)Caminhos da Apropriação Capitalista da Terra em Mato Grosso*. Tese de Doutorado. Dep. de Geografia, USP-SP
- MOUNIER J., 1977 : *Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal*. Thèse d'Etat; Atelier de reproduction des thèses de Lille III, 1979; 3 tomes, 1221 pages
- MOUNIER J., LOZAC'H M., 1981 : L'étude de la nébulosité au-dessus de la France à partir des photos de satellites. *Eaux et climats, Mélanges à C.P.Péguy*, Grenoble, pp.353-368
- MOUNIER J., 1990 : Cartographie des risques naturels par l'image satellite. *Publication de l'association internationale de climatologie*, Vol. 3,1990; pp.83-89
- MOUNIER J., PAGNEY P., 1982 : Climats et satellites. *Annales de géographie*, n°505, pp.275-299

- NEDELEC Vincent, 2001 : *Modélisation et déforestation en Amazonie matogrossense : approche par télédétection*. Mémoire de DEA de géographie de l'Université Rennes 2 ; 92 pages
- NEGRI A.J., ANAGNOSTOU E.N., ADLER R.F., 1999 : A 10-yr Climatology of Amazonian Rainfall Derived from Passive Microwave Satellite Observations. *Journal of applied meteorology*, 39, pp.42-56
- NEPSTAD D.C., 1999 : Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire ; *Nature*, 398 ; pp.505-508
- NICHOLLS M.E., MORAN M.D., WESLEY D.A., LEE T.J., COPELAND J.H., 1992: A comprehensive meteorological modeling system: RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, pp.69-91
- NIMER E., 1989 : *Climatologia do Brasil*, IBGE, Rio de Janeiro, 421 pages
- NOGUÉS-PEAGLE J., K. C. MO, 1997 : Alternating wet and dry conditions over South America in summer. *Monthly Weather Review*, n°125, pp.279-291
- OKE, T., 1978 : *Boundary layer climate*. London: Methuen & Co., 435 pages
- PAGNEY P., 1976 : *Les climats de la Terre*. Masson, Paris, 150 pages
- PAILLEUX J., 2002 : Les besoins en observations pour la prévision numérique du temps, *La Météorologie*, n°39, pp.29-35
- PASQUIS R., 1999 : La déforestation en Amazonie brésilienne et son impact sur l'environnement. *Bois et forêts des Tropiques*, n°260(2), pp.53-64
- PEBAYLE R., 1974 : *Eleveurs et agriculteurs du Rio Grande do Sul*. Thèse de Géographie. Service de reproduction des thèses de l'Université Lille III, 744 pages.
- PEBAYLE R., 1989 : *Les Brésiliens pionniers et bâtisseurs*. Flammarion, Paris, 361 pages
- PEGUY C.P., 1989 : *Jeux et enjeux du climat*. Masson, Paris; 254 pages
- PEGUY C.P., 2001 : *Espace, temps, complexité ; vers une métagéographie*. Belin, Reclus. 283 pages
- PEREIRA A.C., SETZER A.W., 1996 : Comparison of fire detection in savannas using AVHRR's channel 3 and TM images. *Int.J.Remote Sensing*, 17-10: pp.1925-1937
- PEREIRA JR, ALFREDO C, 1997 : *Deteção de queimadas através do sensor AVHRR dos satélites NOAA*. São José dos Campos, 49 pages
- PERRIER A.D., 1987 : Modélisation des échanges de surface: continuum sol-plante-atmosphère. in "climatologie et observations spatiales" CNES, Roscoff, juillet 1986; Cepadues Editions, Toulouse; pp.423-456
- PERZ S.G., ARAMBURU C., BREMNER J., 2005 : Population, land use and deforestation in the pan Amazon Basin : a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru and Venezuela. *Environment, development and sustainability*, n°7, pp.23-49
- PIAIA I.I., 1999 : *Geografia de Mato Grosso*. EdUNIC, Cuiaba, 2^e édition, 207 pages
- PIELKE R.A. et al., 1991 : Nonlinear influence of mesoscale land use on weather and climate ; *Journal of Climate* ; 4 ; pp.1053-1069
- PIELKE R.A., 2001 : Influence of the spatial distribution of vegetations and soils on the prediction of cumulus convective rainfall ; *Reviews of Geophysics* ; 39-2 ; pp.151-177
- PIKETTY M.-G., VEIGA J.B., POCCARD-CHAPUIS R. et TOURRAND J.-F., 2001 : Le potentiel des systèmes agroforestiers sur les fronts pionniers d'Amazonie. *Bois et Forêt des Tropiques*, Cirad Forêt, Montpellier, France.
- PLANCHON, O., BONNARDOT, V. & CAUTENET, S., 2000. Simulation de brise de mer dans la Province Occidentale du Cap (Résolution à 5 km): Exemple de la journée du 4 février 2000. *Pub. Assoc. Int. Climatol.*, Vol.13, pp.482-489
- 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
- POCCARD-CHAPUIS R., MERTENS B., LAQUES A.-E., THALES M., VENTURIERI A., ALVES D., PIKETTY M.-G. et TOURRAND J.-F., 2002 : Modélisation des dynamiques d'élevage bovin à l'échelle du paysage : le cas des fronts pionniers d'Amazonie brésilienne. In Faye B., Ingrand S. (Eds), 2002, *Modélisation du fonctionnement des troupeaux*. Séminaire INRA-CIRAD à Verrières, 17-18 décembre 2001 : Ed CIRAD / INRA. Montpellier, 2002, pp. 77-91
- POCCARD-CHAPUIS R. 2002 : *Les réseaux de la conquête. Filière bovine et structuration de l'espace sur les fronts pionniers d'Amazonie Orientale brésilienne*, thèse de doctorat de géographie, Université Paris X Nanterre.

- POISSONNIER P., 1991 : Localisation des formations nuageuses convectives sur l'Amazonie par télédétection satellitaire (1975-1979) ; *Veille Climatique Satellitaire*, n°39, pp.32-46
- POLCHER J., LAVAL K., 1994 : The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate ; *Journal of Hydrology* ; 155, pp.389-405
- POLIDORI L., FOTSING J.M., ORRU J.F., 2001 : Déforestation et orpaillage: apport de la télédétection pour la surveillance de l'occupation du sol en Guyane française. in "*Le mercure en Amazonie: rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires*" dir. Carmouze J.P., Lucote M., Boudou A., Paris, IRD Editions, pp.473-494
- POMEL S., SALOMON J.N., 1998 : *La déforestation dans le monde tropical*. Presses de l'Université de Bordeaux, 160 pages
- POTTER C.S., KLOOSTER S., de CARVALHO C.R., et al., 2001 : Modeling seasonal and interannual variability in ecosystem carbon cycling for the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research*. 106, pp.10,423-10,446
- POUYLLAU M. (dir.), 1990 : *Télédétection et tiers monde. Méthodologies, pratiques, nouveaux champs et nouveaux enjeux*. Bordeaux, CNRS-CEGET, 394 pages
- PRICE J.C., 1987 : Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, n°21; pp.15-27
- PRINCE S.D., 1991 : A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.12, n°6; pp.1313-1330
- PRINCE S.D., 1991 : Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.12, n°6, pp.1301-1311
- PUISSANT A., 2003 : *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*. Thèse de Doctorat de géographie de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 444 pages
- RADAMBRASIL Projeto, 1983 : *Mapa Fitoecologico a escala 1:1 000 000* , Folha V-20 (Juruena) and Folha V-26 (Cuiaba)
- RADAMBRASIL, 1982 : *Levamento de recursos naturais*, Vol.26, Folha SD.21 (Cuiaba), Rio de Janeiro
- RAINER J.M., 2003 : Les satellites météorologiques. *La Météorologie* n°40, pp.28-32
- RICHARDS K.R., STOKES C., 2004 : A review of forest carbon sequestration cost studies : a dozen years of research. *Climatic Change*, n°63, pp.1-48
- RIVIERE D'ARC H., 1977 : Le Nord du Mato Grosso: colonisation et nouveau "bandeirismo" *Annales de Géographie*, Paris, vol.86, n°475, pp.123-156
- RIVIERE D'ARC H., APESTEGUY C., 1978 : Les nouvelles franges pionnières en Amazonie brésilienne, la vallée de l'Araguaia. *Etudes rurales*, n°69, pp.81-100
- RIVIERE D'ARC H., 1990 : Les relations villes campagnes : l'espace rural amazonien vu de Bélem. *Cahiers du Brésil contemporain : «Amazonie, mythe, actualité et réalités en devenir»*, Paris, n°11, pp.66-75
- ROBIN M., 1995: *La télédétection*. Nathan-Université, 318 pages
- ROCHAS M., JAVELLE J.P., 1993 : *La Météorologie : la prévision numérique du temps et du climat*. Syros, 261 pages
- RODRIGUEZ-YI J.L., SHIMABUKURO Y.E., RUDORFF B.F.T., 2000 : Image segmentation for classification of vegetation using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol.21, n°1, pp.167-172
- ROGAN J., FRANKLIN J., ROBERTS D.A., 2002 : A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, n°80, pp.143-156
- ROME-GASPALDY S., 1998 : *Part de la variabilité climatique sur les fluctuations de la production agricole au Pérou de 1960 à 1993*. Thèse de Doctorat de géographie de l'Université Paris 7, 324 pages
- RONCHAIL J., COCHONNEAU G., MOLINIER M., GUYOT J.L., GORETTI DE MIRANDA, CHAVES A., GUIMARÃES V., 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
- ROUSE J.W., HASS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W., 1973 : Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *3rd ERTS Symposium*, NASA SP 351, pp.309-317
- ROY M., 2000 : Impact of misregistration upon satellite data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol.38, n°4, pp.2017-2032
- RUDEL T.K., COOMES O.T., MORAN E., ACHARD F., ANGELSEN A., XU J., LAMBIN E., 2005 : Forest transitions : towards a global understanding of land use change. *Global environmental change*, n°15, pp.25-31
- RUELLAN D., RUELLAN A., 1989 : *Le Brésil*, Karthala, 209 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
- SAATCHI S.S., 2000 : Mapping land cover types in the Amazon Basin using 1 km JERS-1 mosaic. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.21, n°6&7; pp.1201-1234
- SADER S.A., WINNE J.C., 1992 : RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. *International journal of remote sensing*, 13, pp.3055-3067
- SAMPAIO A.J., 1916 : *A flora do Mato Grosso : Memoria em homenagem aos estudos botânicos da comissão Rondon* ; Arquivos do Museu nacional. Vol.19, 125 pages
- SANDERS L., 1989 : *L'analyse statistique des données en géographie*. Alidade G.I.P. Reclus; Montpellier; 268 pages
- SANSIGOLO C.A., ROGRIGUES R.C.M., ETCHICHURY P.C., 1990 : Tendências nas temperaturas médias do Brasil, *Climanálise*, vol.5, n°9, pp.33-41
- SANT'ANNA NETO, J.L. (dir.), 2002 : *Os climas das cidades brasileiras*, UNESP, Presidente Prudente, 227 pages
- SANTOS M., 1991 : *A urbanização brasileira*. São Paulo: Hucitec, 155 pages
- SCHIFFER R.A., ROSSOW W.B., 1983 : The International Satellite Cloud Climatology Program (ISCCP) : the first project of the World Climate Research Program. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64, pp.779-784
- SCHNELL R., 1987 : *La flore et la végétation de l'Amérique tropicale*. Masson, Paris, 2 volumes, 480-448 pages
- SEGUY L. et BOUZINAC S., 1996 : L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. in *Agriculture et Développement*, CIRAD, n° 12, Imprimerie du CIRAD, 76 pages
- SELLERON G., 1995 : De Landsat-MSS à SPOT: 14 années de déforestation continue sur le front pionnier vénézuélien. *Photo-interprétation*, n°2, pp.97-108
- SELLERON G., LAQUES A.E., 1990 : Dynamique agro-sylvo-pastorale sur un front pionnier tropical du Vénézuéla par télédétection. In : *Télédétection et tiers monde. Méthodologies, pratiques, nouveaux champs et nouveaux enjeux*. Bordeaux, CNRS-CEGET, pp.73-85
- SELLERS P.J., 1986 : Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.6, n°6, pp.1135
- SETTE D.M., 2000 : *O holorrítmo e as interações tropico-extretropico na gênese do clima e as paisagens do Mato Grosso*. Thèse de Doctorat de l'Université de Sao Paulo, 375 pages + annexes
- SETZER, ALBERTO W.; PEREIRA, MARCOS C.; PEREIRA JR, ALFREDO C.; 1992 : *O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil*. vol.7, n°8 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos
- SHAFFER G., 1976 : *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press
- SHIMABUKURO Y.E., CARVALHO V.C., RUDORFF B.F.T., 1997 : NOAA-AVHRR data processing for the mapping of vegetation cover. *Int.J.Remote Sensing*, vol.18, n°3, pp.671-677
- SHIMABUKO Y.E., DUARTE V., MELLO E.M.K., MOREIRA J.C., 1999 : RGB shade fraction images derived from multitemporal Landsat TM data for studying deforestation in the Brazilian Amazon. *Int.J.Remote Sensing*, vol.20, n°4, pp.643-646

- SHUTTLEWORTH W.J., GASH J.H.C., et al., 1991 : Post-deforestation Amazonian climate : Anglo-Brazilian research to improve prediction. *Journal of hydrology*. 129, pp.71-85
- SHUKLA J., NOBRE C., SELLERS P., 1990 : Amazon deforestation and climate change. *Science*, vol.247, pp.1322-1325
- SIERRA R., 2000 : Dynamics and patterns of deforestation in the western Amazon : the Napo deforestation front, 1986-1996. *Applied geography*, n°20, pp.1-16
- SILVA DIAS M.A.F., RUTLEDGE S., et al., 2002 : Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of Geophysical Research*, vol.107, 39, pp.1-18
- SILVA DIAS M.A.F., et al., 2004 : River breeze circulation in eastern Amazonia : observations and modelling results. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.111-121
- SILVA DIAS P.L., DIAS M.A.F.SILVA, 2000 : A validation of the RAMS mesoscale analysis during the WET/AMC-LBA campaign in Rondonia/Brazil. in *4th RAMS Users Workshop*, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey
- SILVEIRA Jr J.C., SALAS ALVES D., ESCADA M.I., 2001 : Utilização de Técnicas de Análise Espacial no Estudo da Correlação entre Expansão das Áreas Desflorestadas e da Fronteira Agropecuária no Estado do Mato Grosso. *Anais X SBSR*, Foz do Iguaçu, INPE, pp. 503-508
- 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
- SMITH A., 1971 : *Mato Grosso, last virgin land*. E.P.Dutton and Co. Inc., New-York, 288 pages
- SMITH G., ASKNE J., 2001 : Clear-cut detection using ERS interferometry. *International Journal of Remote Sensing*, vol.22, n°18; pp.3651-3664
- SOARES FILHO B.S., 1998 : *Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. Tese de doutorado. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 299p
- SOARES-FILHO B.S., ASSUNCAO R.M., PANTUZZO A.E., 2001 : Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *BioScience*, vol.51, n°12, pp.1059-1067
- SOARES-FILHO B.S., CERQUEIRA G.C., ARAUJO W.L., VOLL E., 2004 : Modelagem de dinâmica de paisagem : concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. in *Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais*, ALBERNAZ A.L., da SILVA J.M.C. et VALERIANO D.(coord.), Editora Museu Paraense Emílio Goeldi. (sous presse).
- SOARES-FILHO B.S., ALENCAR A., NEPSTAD D., CERQUEIRA G.C., et al., 2004 : Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarem–Cuiaba corridor. *Global Change Biology*, n°10, pp.745–764
- SOUZA JR. C.M., BARRETO P., 2000 : An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, vol.21, n°1; pp.173-179
- SOUZA JR.C.M., ROBERTS D., 2005 : Mapping forest degradation in the Amazon with Ikonos images. *International Journal of Remote Sensing*, vol.26, n°3; pp.425-429
- SOUZA de E.A., 2004 : *Sinop : historia, imagens e relatos, um estudo sobre a sua colonização*. Ed. UFMT, Cuiaba, Brésil, 314 pages
- SOUX A., VOOGT J.A., OKE T.R., 2004 : A model to calculate what a remote sensor « sees » of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 111, pp.109–132
- SRINIVASAN A., RICHARDS J.A., 1990 : Knowledge-based techniques for multi-source classification, *International Journal Of Remote Sensing*, vol. 11, n°3, pp.505-525
- SULTAN B., BARON C., DINGKUHN M., SARR B., JANICOT S., 2005 : Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, pp.93–110
- TABEAUD M., 1989 : *L'Atlantique tropical austral : l'eau atmosphérique et le climat en milieu océanique*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris IV, 439p.
- TARIFA J.R., 1977 : Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São Jose dos Campos (SP) Brasil, *Geografia*, v.2, n°4, p.59-60

- THERY H., 1976 : *Rondônia, mutations d'un territoire fédéral en Amazonie brésilienne*. Thèse de 3^e cycle de l'Université Paris 1, 309 pages
- THERY H., 1981 : Routes transamazoniennes et réorganisation de l'espace: le cas du Rondônia. *Cahiers d'Outre Mer*, n°34 (133), Bordeaux, pp.5-22
- THERY H., 1986 : *Brésil, un atlas chorématique*. Paris/Montpellier, Fayard/Reclus, 88 pages
- THERY H., 2000 : *Le Brésil*. 4^e édition, A.Colin, Paris, 288 pages
- THERY H. (coord.), 1997 : *Environnement et développement en Amazonie brésilienne*. Belin, 207 pages
- THERY H., 1997 : De quelques modèles amazoniens. *Cahiers des Amériques Latines*, n°24, pp.77-92
- THERY H., 1997 : Routes et déboisement en Amazonie brésilienne : Rondônia 1974-1996. *Mappemonde*, 1997-3, pp.35-40
- THERY H., 2000 : L'Amazonie entre conquête pionnière et développement durable. *Historiens et Géographes*, n°372, pp. 201-212
- THERY H., 2003 : L'Etat brésilien et l'environnement en Amazonie: évolutions, contradictions et conflits. *L'Espace géographique*, 2003-1, pp.3-20
- THERY H., de MELLO N.A., 2003 : *Atlas du Brésil*. Reclus/CNRS/la Documentation Française, Montpellier/Paris, 302 pages
- 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
- TOLE L., 2002 : Population and poverty in Jamaican deforestation : integrating satellite and household census data. *GeoJournal*, 57 (4), pp.251-271
- TONNERRE-GUERIN M.A., 1976: A propos de quelques techniques d'utilisation des images satellites en météorologie: contribution à l'analyse synoptique des latitudes moyennes de l'hémisphère nord. *Noréis*, n°89, pp. 5-31
- TOURRAND J.-F., VEIGA J.B., QUANZ D., FERREIRA L.A. et SIMÃO NETO M. 1999 : Produção leiteira em área de fronteira agrícola da Amazônia : o caso do município de Uruara (PA) na Transamazônica. In *Homma A.K.O., ed. : Amazônia : Meio ambiente e desenvolvimento*. Brasília, Embrapa - SPI / Belém : Embrapa CPATU, Cap. 13, p.345-365.
- TOURRAND J.-F., VEIGA J.B., FERREIRA L.A., LUDOVINO R.M.R., POCCARD-CHAPUIS R., WOOD C. et SIMÃO NETO M., 1999 : Vache et forêt, une possible coexistence en Amazonie brésilienne. In *5 International Livestock Farming System's symposium*, August 19-20, Fribourg, Switzerland.
- TOURRAND J.-F., VEIGA J.B., FERREIRA L.A., LUDOVINO R.M.R., POCCARD-CHAPUIS R. et SIMÃO NETO M., 1999 : Cattle ranching expansion and land-use change in the Brazilian eastern Amazon. In *the conference on Patterns and processes of land use and forest change in the Amazon*. March 23-26, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- TOWNSHEND J.R.G., GOFF T.E., TUCKER C.J., 1985 : Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. GE-23, n°6, pp.888-895
- TOWNSHEND J., JUSTICE C., LI W., GURNEY C., MACMANUS J., 1991 : Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, n°35; pp.243-255
- TRICART J., 1992 : Ce qu'apporte la télédétection à la connaissance du milieu et pour sa gestion, particulièrement en Amazonie: l'expérience de Radambrasil. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, n°5, pp.403-421
- TSAYEM-DEMAZE M., POLIDORI L., FOTSING J.M., 2001 : Caractérisation multi-échelle et multi-capteur de la déforestation tropicale amazonienne. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°161, pp.74-84
- TSAYEM-DEMAZE M., 2002 : *Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection. Application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université d'Orléans. 242 pages
- TUCKER C.J., 1979 : Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, n°8; pp.127-150

- TUCKER C.J., 1986 : Maximum normalized difference vegetation index images for subsaharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, Special issue « Monitoring the Grasslands of Semi-arid Africa using NOAA-AVHRR Data », Vol.7, n°11; pp.1183-1184
- TUCKER C.J., 1996 : History of the use of AVHRR data for land applications. in D'Souza et al.(dir) "Advances in the use of NOAA-AVHRR data for land applications", Euro Courses, Kluwer Academic Publishers, pp.1-13
- TUCKER C.J., TOWNSHEND J.R.G., GOFF T.E., 1985 : Africa land-cover classification using satellite data. *Science*, Vol.227, n°4685; pp.369-375
- TURNER F.J., 1963 : *La frontière dans l'histoire des Etats Unis*. Trad. A.Rambert, éd. Originale 1958, PUF, Paris, 328 pages
- URQUHART G., CHOMENTOWSKI W., SKOLE D., BARBER C., 2001 : *Tropical deforestation*. NASA Earth Observer, 8 pages <http://earthobservatory.nasa.gov>
- VALERIANO D.M., SHIMABUKURO Y.E., DUARTE V., et al., 2005 : Detecção do desflorestamento da Amazônia Legal em tempo real – Projeto DETER. *Anais do XII SBSR*, Goiania, Brésil, pp.3403-3409
- VERGER F. (Dir.), SOURBES I., GHIRARDI F., PALAZOT Y., 1992 : *Atlas de géographie de l'espace*. Montpellier, SIDES-Reclus, 289 pages
- VIANELLO R.L., ALVES A.R., 2002 : *Meteorologia basica e aplicações*. Ed.Fed de Viçosa, 2° édition, 449 pages
- VIDIGAL DA FONSECA C., 1992 : *Sinop: a Terra Prometida. Geopolítica da Ocupação da Amazônia*. Dissertação de Mestrado. Dep. de Geografia. USP-SP
- VIGNEAU J.P., 2000 : *Géoclimatologie*. Ellipses-Universités, 334 pages
- VON RANDOW C., MANZI A.O., KRUIJT B., et al., 2004 : Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n°1-3, pp.5-26
- VOURLITIS G.L., PRIANTE FILHO N., et al., 2002 : Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. *Water resources research*, vol.38, pp.1-11
- VULQUIN A., 1979 : *Comparaison entre le climat de Buenos Aires et les climats de la façade orientale du Brésil*. Thèse d'Etat de l'Université de Bourgogne, 2 tomes, 555 pages
- WAHL L., 1997 : *La dynamique spatio-temporelle des brouillards de rayonnement dans le Fossé Rhénan méridional à l'aide d'images NOAA-AVHRR*. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Strasbourg,
- WALKER R., MORAN E., ANSELIN L., 2000 : Deforestation and cattle ranching in the Brazilian Amazon : external capital and household processes. *World development*, vol.28, n°4, pp.683-699
- WALKO R.L., TREMBACK C.J., PIELKE R.A., COTTON W.R., 1995 : An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *Journal of Applied Meteorology*, 34, pp.994-999
- WANG F., 1993 : A knowledge-based vision for detecting land changes at urban fringes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.31, n°1, pp.136-145
- WANG J., PRICE K.P., RICH P.M., 2003 : Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA., *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, n°11, pp 2345-2364.
- WANIEZ P., 1992 : *Les Cerrados, un "espace-frontière" brésilien*. Montpellier, GIP-RECLUS, ORSTOM, Coll. Territoires, 344 pages
- WANIEZ P., BRUSTLEIN V., DAVID M.B., 1999 : Les mutations de l'espace agropastoral brésilien: 1975-1996. *Mappemonde*, 53-1, pp.26-33
- WASSMANN R., VLEK P.L.G., 2004 : Mitigating greenhouse gas emissions from tropical agriculture : scope and research priorities. *Environment, Development and Sustainability*. 6 (1-2), pp.1-9
- WIEGAND C.L., RICHARDSON A.J., ESCOBAR D.E., GERBERMANN A.H., 1991 : Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, n°35; pp.105-119
- 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

- WILMET J., 1996: *Téledétection aérospatiale: méthodes et applications*. Sides, 300 pages
- WOODCOCK C.E., MACOMBER S.A., PAX-LENNEY M., COHEN W.B., 2001 : Monitoring large areas for forest change using Landsat: generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, n°78-1-2, pp.194-203
- 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
- XIE P., ARKIN P.A., 1998 : Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol.11, pp.137-164
- 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
- ZADEH L.A., 1965 : Fuzzy sets. *Information and control* ; 8, pp.338-353
- ZAMPARONI C., 2001 : *Desmatamento, Urbanização do Campo e Variabilidade Climática na Amazônia Mato-Grossense*. Tese de Doutorado Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH) - Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, 271 pages
- ZAMPARONI C.A.G.P, LOMBARDO M.A., 1997 : Ilha de calor em cidades de pequeno porte nos tropicos ; *Boletim Climatológico*, FCT-UNESP, 3-2, pp.40-42
- ZAVATTINI J.A., 2004 : *Estudos do clima no Brasil*. Ed. Alinea, Campinas-SP, Brésil, 398 pages
- ZHANG Q., DEVERS D., DESCH A., JUSTICE C.O., TOWNSHEND J., 2005 : Mapping tropical deforestation in Central Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 101, pp.69-83

SOURCES UTILISEES :

Images satellites :

ESA: European Space Agency, Darmstadt, RFA
www.eumetsat.de

DMSP : Defense Meteorological Satellite Program
www.ngdc.noaa.gov/dmsp

GEOSYS Toulouse, France
www.geosys.fr

INPE: Instituto National das Pesquisas Espaciais , São José dos Campos, SP- Brasil
www.inpe.br

SAA: Satellite Active Archive de la NOAA
www.saa.noaa.gov

SATMOS: Centre de Météorologie Spatiale, Météo France, Lannion, France
www.satmos.meteo.fr

SPOT Image: Toulouse, France
www.spotimage.fr

TRFIC: Tropical Rain Forest Information Center, Basic Science and Remote Sensing Initiative, Michigan State University.
www.bsrsi.msu.edu/trfic

Données climatiques :

ANEEL : Agencia Nacional de Energia Elétrica
www.aneel.gov.br/

INMET : Instituto National da Meteorologia do Brasil
www.inmet.gov.br/

Statistiques démographiques et économiques :

IBGE : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
www.sidra.ibge.gov.br/

SIGLES et GLOSSAIRE

- Aldéia** : village ou siège de communauté indien
- Alqueire** : mesure brésilienne : 1 alqueire pauliste vaut 2,38 hectares
- ANA** : Agence Nationale de l'Eau brésilienne
- ANEEL** : Agence Nationale de l'Energie Electrique
- Assentamento** : établissement rural de colonisation agricole divisé en lots
- AVHRR** : Advanced Very High Resolution Radiometer,
- Bandeirante** : de bandeira, bannière, désigne les personnes menant les expéditions vers l'intérieur du pays à la recherche d'esclaves ou de pierres précieuses.
- Capim** : pâturage artificiel à base de graminées
- Capoeira** : repousse forestière ou végétation secondaire après défrichement
- CBERS** : China-Brazil Earth Resources Satellite
- CEPLAC** : Comissão Executiva para o Plano da Lavoura Cacaueira
- CEPMMT (ECWMF en Anglais)** : Centre Européen de Précision Météorologique à Moyen Terme
- Cerrado** : savane plus ou moins arborée de l'intérieur brésilien
- Cerradão** : savane arborée dense
- Chacarra** : petite propriété généralement péri urbaine à vocation maraîchère ou résidentielle
- Chapada** : plateau plus ou moins horizontal et à rebords abrupts
- Colonizadora** : entreprise privée de colonisation
- Desmatamento/Desflorestamento** : déboisement/déforestation
- Derrubada** : abattis forestier avant le brûlis
- DETER** : Detecção em Tempo Real do desflorestamento na Amazônia
- DMSP** : Defense Meteorological Satellite Program
- EMBRAPA** : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EMPAER** : Empresa Matogrossense de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural
- ENSO** : El Niño Southern Oscillation
- Favela** : bidonville
- Fazenda** : grande propriété foncière
- Fazendeiro** : grand propriétaire terrien
- FEMA** : Fundação Estadual do Meio Ambiente do Mato Grosso
- Friagem** : vague de temps frais et humide de l'hiver austral atteignant les régions tropicales
- Garimpo** : lieu de recherche et d'extraction d'or et de pierres précieuses
- Garimpeiro** : chercheur d'or ou de pierres précieuses
- Gaúcho** : à l'origine "cow-boy" du Rio Grande do Sul et, par extension, habitant de cet Etat
- GDR MSG-ATR** : Groupement de Recherche du CNRS sur l'Acquisition en Temps Réel des données Météosat Seconde Génération
- GDR RICLIM** : Groupement de Recherche du CNRS sur les risques liés au climat
- Gleba** : grande étendue de terre relevant d'un projet de colonisation publique ou privée
- GOES** : Geostationary Operational Environmental Satellite
- IBAMA** : Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e das Recursos Naturais
- IBGE** : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INCRA** : Instituto Nacional da Colonização e Reforma Agraria
- INMET** : Instituto Nacional da Meteorologia do Brasil
- INPE** : Instituto Nacional das Pesquisas Espaciais
- Latifundio** : Grande propriété rurale, le plus souvent peu mise en valeur ou de manière extensive.
- LBA** : Large scale Biosphere-Atmosphere interactions in Amazonia

Linha : piste de desserte des propriétés dans un projet de colonisation ; désigne par extension l'ensemble des lots qui la borde

Matogrossense : de l'Etat du Mato Grosso

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSG : Meteosat Seconde Génération

Município: unité administrative brésilienne élémentaire correspondant à la commune (mais pouvant au Mato Grosso s'étendre sur plusieurs milliers de km²).

Murundu : petit monticule de terre d'origine biologique (termites) et portant une végétation ligneuse contrastant avec la strate herbacée environnante du cerrado

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation Normalisé)

NOAA : National Oceanographic and Atmospheric Administration, nom de l'agence gouvernementale américaine qui gère les satellites du même nom.

PAC : Projeto de Assentamento Conjunto

Paulista : de la région de Sao Paulo

Peões : travailleur saisonnier au statut souvent très précaire

PIR : Proche InfraRouge

Posseiro : petit paysan installé sur des terres publiques ou privées sans droit de propriété.

PREVFOGO : Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais

PROARCO : Programa Nacional de Prevenção e Controle às Queimadas e aos Incêndios Florestais no Arco do Desflorestamento

PRODEAGRO : projeto de desenvolvimento agroambiental do estado do Mato Grosso

PRODES : Programa de Monitoramento do desmatamento na Amazônia Legal

Queimadas : feux, incendies

RAMS : Regional Atmospheric Modeling System

Safra : culture principale, au Mato Grosso semée en octobre et récoltée en février

Safrinha : culture secondaire, au Mato Grosso semée en février-mars et récoltée en juin

SCM : systèmes convectifs de méso-échelle

Seringueiro : collecteur du latex sur les hévéas pour la fabrication du caoutchouc

Sítio : petite propriété rurale dont l'activité est essentiellement agricole

SSM/I : Special Sensor Microwave / Imager

SUDAM : Superintendance de Développement de l'Amazonie

TREES : Tropical Ecosystem Environment observation by Satellite

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

Varzea : plaine d'inondation des grands fleuves amazoniens

Veranico : interruption (de plusieurs jours à 2-3 semaines) des précipitations pendant la saison des pluies

Voçorocas : ravinements de dimension souvent pluri-métrique provoqués par les fortes pluies tropicales et l'absence de couverture végétale des sols

ZCAS : Zone de Convergence de l'Atlantique Sud

ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

Liste des figures

Introduction

Figure 0.1 : Les thèmes et les méthodes du projet de recherche	5
Figure 0.2 : Une recherche collective : les partenaires au sein du laboratoire COSTEL	7
Figure 0.2 : Une recherche collective : les partenaires à l'extérieur de COSTEL	8

1^e Partie : Le front pionnier du Mato Grosso

Figure 1.1 : Les grands types de paysages du Mato Grosso	17
Figure 1.2 : la végétation du Mato Grosso	18
Figure 1.3 : Carte du relief du Mato Grosso	19
Figure 1.4 : Défrichements au Rondônia et à l'est du Mato Grosso vus par NOAA-14	20
Figure 1.5 : Variations annuelles du total déboisé en Amazonie brésilienne et au Mato Grosso	23
Figure 1.6 : Chemins d'exploitation forestière sur le município de Santa Carmem (fazenda Santa Cruz), à l'est de Sinop	25
Figure 1.7 : Localisation du secteur d'étude sud du programme « BR-163 »	27
Figure 1.8 : Occupation du sol dans la région de Sinop en 1999	28
Figure 1.9 : Carte des municípios du Mato Grosso (situation 1998)	29
Figure 1.10 : Extension des surfaces boisées dans le centre du Mato Grosso	31
Figure 1.11 : Evolution du couvert forestier de 1990-2000 d'après les images NOAA-AVHRR	31
Figure 1.12 : les méga-clairières du Mato Grosso	32
figure 1.13 : The pixel view of the world	33
Figure 1.14 : Types de changements spatiaux et impact des erreurs de positionnement sur les méthodes de détection par minimum et maximum composite	34
Figure 1.15 : Superposition des limites des aires déboisées obtenues par SPOT-VGT sur une image Landsat-ETM+ dans la région de Claudia en août 1999	35
Figure n°1.16 : Suivi annuel de la déforestation par imagerie SPOT Vegetation	37
Figure n°1.17: Luminance spectrale en fonction de la température des surfaces et la longueur d'onde pour les canaux 3 et 4 de AVHRR	40
Figure 1.18 : Saturation du canal 3 sur l'image NOAA-14 du 10 juillet 1997	41
Figure 1.19 : Les feux détectés par NOAA-12 en 2004 au Brésil et au Mato Grosso	42
Figure 1.20 : Une forme « étrange » au milieu de la forêt : la fazenda Cumburiu	45
Figure 1.21 : un exemple de prise de notes le long des lignes 13 et D de Carlinda	46
Figure 1.22 : Les missions de terrain réalisées au Mato de 1997 à 2005	47
Figure 1.23 : Evolution du cheptel bovin au Mato Grosso de 1977 à 2003	50
Figure 1.24 : Principales productions agricoles (tonnes) au Mato Grosso	59
Figure 1.25: Evolution de la production de soja par município au Mato Grosso de 1990 à 2003	60
Figure 1.26 : Principales cultures temporaires par município en 2003	60
Figure 1.27 : Images satellites Landsat de 1975 et 1999 sur la Chapada dos Parecis	63
Figure 1.28 : Cartographie par photo-interprétation de l'évolution de la mise en valeur agricole dans la région de Tangará da Serra de 1973 à 2002	63
Figure 1.29 : Croquis de synthèse de l'organisation spatiale autour de Tangará da Serra	65
Figure 1.30 : Population des villes du Mato Grosso en 1975 et 1996	69

Figure 1.31 : Distribution selon la loi rang-taille des villes du Mato Grosso	70
Figure 1.32 : Evolution de la déforestation sur le <i>município</i> de Sinop	71
Figure 1.33 : Occupation du sol Sur le <i>município</i> de Sinop en 1999	72
Figure 1.34 : Cartographie par photo-interprétation d'images Landsat de l'évolution de l'aire urbaine de Sinop (1975-2003)	74
Figure 1.35 : Occupation du sol autour de Sinop en 1999	76
Figure 1.36 : relation entre surface urbanisée et population pour les villes de Sinop, Sorriso et Alta Floresta de 1975 à 2003	77

2^e partie : Le climat du Mato Grosso : de la nécessité du recours à la télédétection

Figure 2.1 : Evolutions comparées des rendements de maïs et de la pluviométrie de Mars-avril-mai à Campo Novo do Parecis et Sorriso	85
Figure 2.2 : Evolution des rendements de soja au Mato Grosso de 1990 à 2003	86
Figure 2.3 : Les réseaux d'observation météorologique au sol	89
Figure 2.4 : Un marqueur du front pionnier : la date de mise en service des postes pluviométriques du Mato Grosso	91
Figure 2.5 : Pourcentage de données manquantes dans les séries pluviométriques	92
Figure 2.6 : quelques exemples de problèmes de localisation des stations du Mato Grosso	94
Figure 2.7 : Les régimes pluviométriques moyens mensuels du bassin amazonien	96
Figure 2.8 : Régimes pluviométriques moyens mensuels au Mato Grosso	97
Figure 2.9 : Températures et précipitations moyennes mensuelles (1978-1999) à Alta Floresta (Aéroport)	98
Figure 2.10 : Relevés horaires de températures et précipitations pendant le mois de février 2002 à Alta Floresta	98
Figure 2.11 : Relevés horaires de températures et précipitations pendant le mois de juin 2002 à Alta Floresta	98
Figure 2.12 : organigramme des traitements effectués sur les images GOES	108
Figure 2.13 : suivi des précipitations, occurrences et Tmax à Cuiaba 1999-2001	110
Figure 2.14 : suivi des précipitations, occurrences et Tmax à Vera 1999-2001	110
Figure 2.15 : Synthèses mensuelles GOES des TMax de sept.1999 à août 2000	111
Figure 2.16 : Synthèses mensuelles des Occurrences de sept.1999 à août 2000	111
Figure 2.17 : Synthèses mensuelles GOES des TMax de sept.2000 à août 2001	112
Figure 2.18 : Synthèses mensuelles des Occurrences de sept.2000 à août 2001	112
Figure 2.19 : Régressions entre les précipitations mensuelles et les occurrences de nuages à sommet froid GOES	114
Figure 2.20 : Régressions entre les précipitations mensuelles et les températures maximales GOES	114
Figure 2.21 : cartographie des précipitations de l'année 1999-2000 au Mato Grosso	119
Figure 2.22 : cartographie des précipitations de l'année 2000-2001 au Mato Grosso	120
Figure 2.23 : Cartographie des résidus (en mm) de l'estimation des précipitations annuelles au Mato Grosso en 1999-2000 et 2000-2001	121
Figure 2.24 : Synthèses mensuelles des NDVI SPOT-VGT (moyennes 1998-2004)	124
Figure n°2.25 : Profils temporels des NDVI mensuels SPOT-VGT pour différents types de couverts	125
Figure 2.26 : Evolution mensuelle du NDVI et des précipitations à Sinop (fazenda Sempre Verde) de 1998 à 2003	126
Figure 2.27 : Corrélation entre les NDVI et les précipitations du mois précédent pour	

les secteurs en culture des municípios du centre du Mato Grosso de 1999 à 2003	127
Figure 2.28 : relations entre les cumuls du NDVI (septembre-janvier) et les rendements de soja de 1999 à 2003 pour 3 municípios du Mato Grosso	129
Figure 2.29: relations entre les cumuls du NDVI (mars-juin) et les rendements de maïs de 1999 à 2003 pour 3 municípios du Mato Grosso	130

3^e partie : de l'observation à la modélisation : l'impact du front pionnier sur le climat

Figure 3.1 Estimation des changements d'utilisation du sol dans le monde de 1700 à 1995	138
Figure 3.2 : Simulations de l'Amazonie légale en 2020	139
Figure 3.3 : Diminution de la couverture forestière pour 4 scénarii et sous-régions amazoniennes	139
Figure 3.4 : Types d'organisations spatiales forêt/ non-forêt et leur interprétation	141
Figure 3.5 : Opposition entre grandes fazendas d'élevage (au nord-ouest) et des petites propriétés sur le município de Peixoto de Azevedo	141
Figure 3.6 : Défrichement en vaste clairière autour de Claudia	141
Figure 3.7 : Défrichement généralisé et forêts galeries autour de Lucas do R.V.	141
Figure n°3.8 : Evolution de la déforestation dans la ligne 13 de Carlinda	142
Figure 3.9 : Pourcentage de déforestation de part et d'autres des principales routes amazoniennes asphaltées et en terre	143
Figure 3.10 : La déforestation de part et d'autre de la BR-163 dans le Mato Grosso	144
Figure 3.11 : Sorties du modèle DINAMICA sur l'évolution de l'occupation du sol 1996-2026 le long de la BR-163 selon 2 scénarii	145
Figure 3.12 : Carte des distances par rapport aux routes asphaltées et aux pistes principales	146
Figure 3.13 : Carte de distances par rapport aux villes principales et aux préfectures	146
Figure 3.14 : Distance aux villes et déforestation selon un gradient Nord (Marcelandia) Sud (Lucas do RV) en passant par Sinop	147
Figure 3.15 : Distance aux villes et déforestation à Alta Floresta et Claudia	148
Figure 3.16 : Carte synthétique des risques de déforestation en fonction des distances aux routes et aux villes	149
Figure 3.17 : Les espaces protégés au Mato Grosso	152
Figure 3.18 : La carte de défrichement en 2000	152
Figure 3.19 : Le modèle de défrichement routes+villes	152
Figure 3.20 : Carte de croyance Non-Forêt	153
Figure 3.21 : Carte d'incertitude Non-Forêt	153
Figure 3.22 : Les échanges radiatifs en ville et à la campagne	156
Figure 3.23 : Localisation des stations météorologiques installées à Sinop en 2004-05	160
Figure 3.24 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 15/06/2003 au 19/06/2003 dans la région d'Alta Floresta	161
Figure 3.25 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 19/08/2003 au 31/08/2003 dans la région d'Alta Floresta	161
Figure 3.26 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/09/2003 au 30/09/2003 dans la région d'Alta Floresta	162
Figure 3.27 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/10/2003 au 13/10/2003 dans la région d'Alta Floresta	162
Figure 3.28 : Relevés thermiques à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005	163

Figure 3.29 : Relevés thermiques moyens à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005	164
Figure 3.30 : Ecart thermique moyen à Sinop (stations DAVIS-WM2, pas de 5 minutes) du 10 au 15 avril 2005	164
Figure 3.31 : Transect thermique du 22 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 21h53 à 22h12 locales	167
Figure 3.32 : Transect thermique du 22 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 22h22 à 22h47 locales	167
Figure 3.33 : Transect thermique du 23 juin 2003 à SINOP-MT : relevés réalisés de 5h19 à 6h15 locales	168
Figure 3.34 : Schéma du bilan de surface au-dessus d'un sol nu et d'une forêt	171
Figure 3.35 : Moyennes journalières de la radiation solaire incidente (S_{in} , cercles), de la radiation réfléchie (S_{out} , triangles inversés) et de la radiation nette (R_n , losanges) pendant la saison humide (a) et sèche (b). Même chose pour la radiation infrarouge incidente (L_{in} , carrés) et émise (L_{out} , triangles) pendant la saison humide (c) et sèche (d).	172
Figure 3.36 : Localisation des stations météorologiques dans la région d'Alta Floresta	173
Figure 3.37 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 26/02/2002 au 16/03/2002 dans la région d'Alta Floresta	175
Figure 3.38 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 03/04/2003 au 30/04/2003 dans la région d'Alta Floresta	175
Figure 3.39 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/05/2003 au 31/05/2003 dans la région d'Alta Floresta	176
Figure 3.40 : Relevés de température (stations DAVIS-WM2) du 01/06/2003 au 15/06/2003 dans la région d'Alta Floresta	176
Figure 3.41 : Schéma des étapes et des choix réalisés pour la modélisation à méso-échelle RAMS	182
Figure 3.42 : Relief et grilles utilisées pour la modélisation à méso-échelle	183
Figure 3.43 : Simplification par classification et ré-échantillonnage à 1 kilomètre de l'image Landsat de l'occupation du sol en 1999 de la région d'étude rapprochée	184
Figure 3.44 : Données d'entrée du modèle RAMS : couches végétation des grilles 1 et 2 pour 1970 et 2000	185
Figure 3.45 : Profils thermiques horaires pour la journée du 19 mai 2000	186
Figure 3.46 : Profils thermiques horaires des différences constatées pour la journée du 19 mai 2000	186
Figure 3.47 : Résultats de la simulation à méso-échelle pour les températures en 1970 et 2000	188
Figure 3.48 : Résultats de la simulation à méso-échelle pour l'humidité relative (en %) en 1970 et 2000	189

Liste des tableaux

1^e Partie : Le front pionnier du Mato Grosso

Tableau 1.1 : Estimation des taux de couverture (en % de la surface continentale) des forêts tropicales	21
Tableau 1.2: Surface totale déboisée en km ² par Etats (Amazonie brésilienne)	22
Tableau 1.3 : Estimations comparées des aires déboisées (en km ²) au Mato Grosso	23
Tableau 1.4 : Répartition de la surface déboisée en fonction de la taille des secteurs observés en 2000-2001	24
Tableau 1.5 : Déforestation par município (limites 1998) entre 1992 et 1999	30
Tableau 1.6 : Surface totale déboisée en km ² par município (d'après images NOAA-AVHRR)	32
Tableau 1.7 : Evolution de la surface urbanisée et de la population à Sinop	72

2^e partie : Le climat du Mato Grosso : de la nécessité du recours à la télédétection

Tableau 2.1 : Synthèse des types de climats au Mato Grosso	99
Tableau 2.2 : Comparaison des performances de Météosat et MSG	105
Tableau 2.3 : Coefficients de corrélation (r) entre les pluies mesurées au sol et les données GOES en fonction du pas de temps en 1999-2000	113
Tableau 2.4 : Coefficients de corrélations (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouges GOES pour la saison 1999-2000	115
Tableau 2.5 : Coefficients de corrélations (r) entre les pluies mesurées au sol et les données infrarouges GOES pour la saison 2000-2001	115
Tableau 2.6 : Corrélations et régressions entre les précipitations annuelles et les paramètres géographiques (latitude, longitude, altitude) et satellitaires	117
Tableau 2.7 : Altitude et précipitations moyennes annuelles pour les stations de la Chapada dos Parecis et de la Chapada dos Guimarães	118
Tableau 2.8 : Synthèse des résidus (absolus et relatifs) des estimations des précipitations annuelles au Mato Grosso en 1999-2000 et 2000-2001	121
Tableau 2.8 : Corrélations entre les rendements de soja 1999-2003 et différents indicateurs NDVI de SPOT-VGT	128
Tableau 2.9 : Corrélations entre les rendements de maïs 1999-2003 et différents indicateurs NDVI de SPOT-VGT	130

3^e partie : de l'observation à la modélisation : l'impact du front pionnier sur le climat

Tableau 3.1 : Synthèse du bilan radiatif moyen sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana	172
Tableau 3.2 : Valeurs moyennes des flux de chaleur sensible (H) et latente (λE) sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana	172
Tableau 3.3 : Comparaison des résultats de simulation sur l'impact climatique régional d'une déforestation totale de l'Amazonie	180
Tableau 3.4 : Résultats de la classification de l'image Landsat de 1999	184

Liste des photos

1^e Partie : Le front pionnier du Mato Grosso

Photo 1.1 : Parcelle en cours de défrichement à l'est d'Itanhanga	9
Photo 1.2 : Au milieu de la forêt, entre Ipiranga do Norte et Ipiranga, l'annonce de futures installations de stockage de grains d'une grande multinationale	36
Photos 1.3 : De la forêt au soja	38
Photos 1.4 : Etapes du défrichement et brûlis des parcelles	38
Photos 1.5 : Sur les pistes du Mato Grosso	44
Photo 1.6 : fazenda Cumburuui	45
Photo 1.7 : saignée d'hévéa à la fazenda Cumburuui	45
Photo 1.8 : Interview d'une famille dans un sitio de l'assentamento Caete	45
Photo 1.9 : un exemple du problème de l'entretien des ponts sur les pistes à Carlinda	46
Photos 1.10 : Paysages de pâturages dans la région de Colider le long de la BR-163	49
Photo 1.11 : Vue de la BR-163 à la hauteur de la ville d'Itauba	52
Photo 1.12 : Une des nombreuses scieries d'Itauba	52
Photo 1.13 : Paysage du garimpo da cabeça, Alta Floresta	54
Photo 1.14 : Descente dans le puits du garimpo da cabeça	54
Photo 1.15 : Tamisage du minerai d'or	54
Photo 1.16 : Arrivée à la ville de Peixoto par le sud et la BR-163	55
Photo 1.17 : Paysage d'anciens garimpos dans la région de Peixoto	55
Photo 1.18 : Culture de la canne à sucre sur la Chapada dos Parecis	61
Photo 1.19 : Récolte mécanisée du coton dans la Chapada dos Parecis	61
Photos 1.20 : En haut : la ville de Claudia en novembre 1979 et en 2003	69
Photo 1.21 : le siège de la municipalité de Vera (prefeitura) en 2002	70
Photos 1.22 : vues aériennes et de l'avenue centrale de Sinop	73
Photo 1.23 : Sinop vue d'avion	74
Photo 1.24 : Les fumées des scieries à Sinop	75
Photo 1.25 : séance d'inhalation à l'hôpital de Sinop	75
Photo 1.26 : résidences aisées du quartier Maringa à Sinop	76
Photo 1.27 : habitat social du quartier Bom Jesus à Sinop	76

2^e partie : Le climat du Mato Grosso : de la nécessité du recours à la télédétection

Photo 2.1 : Averse convective isolée au-dessus d'une parcelle de maïs au sud de Sinop	81
Photo 2.2 : la station météorologique de Vera	93
Photo 2.3 : Vue partielle de la station DAVIS (Weather Monitor 2) installée dans le parc de l'hôtel Floresta Amazônica d'Alta Floresta.	98
Photo 2.4 : début d'organisation de la convection au-dessus de Cuiaba en fin de matinée	100
Photo 2.5 : Pâturage artificiel en Tanzânia (<i>Panicum maximum</i> Jacq.) à Alta Floresta	126
Photo 2.6 : Récolte mécanisée du maïs à Terra Nova do Norte	129
Photo 2.7 : Pivot d'irrigation à Sorriso	131
Photo 2.8 : Arrivée d'un orage en début d'après-midi sur la Chapada dos Parecis entre Tangara da Serra et Campo Novo do Parecis	133

3^e partie : de l'observation à la modélisation : l'impact du front pionnier sur le climat

Photo 3.1 : Formation d'un panache nuageux cumuliforme à partir d'un feu de défrichement à l'est de Sinop	135
Photos 3.2 : Station « campagne » d'Alta Floresta installée dans un pâturage à 5 kilomètres à l'est de la ville	159
Photo 3.3 : Station « campagne » de Sinop installée dans le centre expérimental de l'EMPAER	159
Photo 3.4 : Station « périphérie » de Sinop installée dans le quartier Palmeiras	159
Photo 3.5 : Station « centre ville » de Sinop installée dans la cour des bureaux de l'EMPAER	159
Photos 3.6 : Fazenda São Nicolau (ou « fazenda Peugeot » !) à Cotriguaçu	170
Photo 3.7 : Vue de la station Davis-WM2 installée au Cristalino-Jungle Lodge au nord d'Alta Floresta	174
Photo 3.8 : Vue vers l'ouest de la forêt environnant le Cristalino-Jungle Lodge	174
Photo 3.9 : Vue du ponton d'arrivée au Cristalino-Jungle Lodge	174

Table des matières

Introduction	3
---------------------	----------

1^e partie : LE FRONT PIONNIER DU MATO GROSSO : APPORT DE LA TELEDETECTION POUR LE SUIVI D'UNE REGION SOUMISE A UNE FORTE PRESSION ANTHROPIQUE	9
---	----------

1.1 - De la forêt à la déforestation	12
111- De la « frontier » au front pionnier	12
112- Suivi des forêts tropicales par NOAA-AVHRR	15
113- Quantification de la déforestation : l'Etat déboisant le plus dans le pays déboisant le plus...	21
114- La nécessité d'un suivi à échelle régionale de la déforestation au Mato Grosso	27
115- Le problème des feux et de leur suivi par télédétection	39
1.2 – Des projets de colonisation aux pâturages	43
121- missions et travaux de terrain à l'échelle régionale	43
122- Les phases de la mise en valeur matogrossense : la « frontière du bois et des pâturages »	48
123- L'essor et les difficultés posées par l'extraction aurifère	54
1.3 - Vers le soja : exemple de la Chapada dos Parecis	58
131- Une région agricole riche et diversifiée	58
132- Les étapes de la mise en place et de la conquête pionnière	61
133- L'organisation territoriale actuelle : contrastes sociaux et spatiaux	64
1.4 - La « forêt urbanisée »	68
141- L'urbanisation matogrossense	68
142- La croissance urbaine à SINOP : une dynamique récente	71
143- Cartographie par télédétection de l'aire urbaine de SINOP	72
144- Surface urbanisée et population urbaine	77
Conclusion de la première partie	79

2^e partie : LE CLIMAT DU MATO GROSSO : DE LA NECESSITE DU RECOURS A LA TELEDETECTION	81
--	-----------

2.1 - Agriculture et climat au Mato Grosso : une demande croissante !	84
2.2 - Le Mato Grosso : une région mal connue sur le plan climatique	87
221. Les lacunes des données d'observation au sol	87
222. Un contexte climatique marqué par un gradient nord-ouest / sud- est	95

2.3 - Climat et satellites : la diversité des méthodes et données satellitaires disponibles pour l'étude du climat	102
231. Un développement progressif de techniques maintenant opérationnelles	102
232. Apport des données satellitaires pour l'estimation des précipitations	106
2.4 - Utilisation des synthèses infrarouge GOES pour le suivi des pluies de 1999 à 2001	109
241. Suivi de la saison des pluies 1999-2000 et 2000-2001	109
242. Corrélations entre précipitations, occurrences et Tmax	113
243. Estimation des précipitations annuelles et lien avec la topographie	116
Synthèse des résultats sur l'estimation des précipitations	121
2.5 - Apport des synthèses NDVI SPOT-Végétation pour le suivi des interactions climat-agriculture	123
251. Profils saisonniers et pluviométrie	123
252. NDVI et rendements agricoles	128
Conclusion de la 2^e partie	132
<hr/>	
3^E partie : DE L'OBSERVATION A LA MODELISATION : L'IMPACT DU FRONT PIONNIER SUR LE CLIMAT	135
<hr/>	
3.1 - Modéliser la dynamique du front pionnier :	138
311. L'importance des facteurs économiques	138
322. Du global au local : la traduction spatiale des dynamiques socio-économiques	141
L'importance des voies de communication : exemple de la BR-163	146
Distances aux villes	143
313. Utilisation de la théorie des évidences de Dempster-Shafer	150
314. Les nécessités de la modélisation pour montrer la faisabilité des systèmes de production durables	153
3.2 - Mesures des conséquences climatiques de l'urbanisation dans le Nord du Mato Grosso	155
321- Etude des climats urbains au Brésil	155
322- Contexte climatique et quantification de l'îlot de chaleur urbain	158
323- Résultats des mesures par transects thermiques mobiles de juin 2003 à Sinop	165
3.3 - Déforestation et climat : théories et mesures à l'échelle locale dans la région d'Alta Floresta	170
331- Bilan radiatif comparé forêt/pâturages	171

332- Ecart thermique entre forêt et pâturages dans la région d'Alta Floresta	173
3.4. Modélisation des conséquences climatiques de la déforestation à l'échelle régionale	179
341- Des recherches surtout concentrées sur les répercussions régionales « larges » de la déforestation en Amazonie	179
342- Cadre d'étude et méthodologie de l'expérimentation à méso-échelle	181
343- Résultats de la simulation climatique à méso-échelle	185
CONCLUSION GENERALE	191
Bibliographie	197
Sources utilisées	216
Sigles et Glossaire	217
Liste des figures	219
Liste des tableaux	223
Liste des photos	224