

ÉTUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LES TEMPÉRATURES DANS LA RÉGION D'ALTA FLORESTA, BRÉSIL

Vincent DUBREUIL, Hervé QUÉNOL, Vincent NEDELEC, Jean François MALLET, Laurent DURIEUX et Gilda MAITELLI

Résumé

La transformation de la forêt en pâturages en Amazonie brésilienne a des conséquences sensibles sur le climat à l'échelle locale. Cet article propose de comparer les températures mesurées entre 2006 et 2007 à partir d'observations locales dans la région d'Alta Floresta (Mato Grosso, Brésil) entre un espace déboisé et un massif forestier situé dans une réserve. Le secteur défriché apparaît toujours globalement plus chaud et plus sec (de 5 à 10%) que la région forestière. 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). L'effet d'îlot de chaleur urbain est également particulièrement bien marqué surtout pendant la nuit et la saison sèche.

Mots clés

Déforestation, températures, Amazonie

Abstract

The transformation of the forest into pastures in the Brazilian Amazon leads to significant climatic consequences at a local scale. This paper proposes to compare the temperatures observed between 2006 and 2007 using local measurements in the area of Alta Floresta (Mato Grosso, Brazil) between a cleared sector and a forested one located in a reserve. The cleared sector always appeared hotter and drier (from 5 to 10%) than the forested area. This variation was especially marked during the day when it reached on average about 2°C but also seemed to increase during the night with the arrival of the dry season (+0,5°C). The Urban Heat Island is also obvious especially during the night and the dry season.

Keywords

Deforestation, temperatures, Amazonia

INTRODUCTION

De nombreuses études ont souligné la spécificité du climat de l'Amazonie et notamment l'importance de l'interaction entre la forêt et le climat (Nimer, 1989). 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). Ainsi, la transformation du paysage et principalement le remplacement de la forêt tropicale par des pâturages contribuent à modifier sensiblement le bilan radiatif à l'échelle locale. Cette étude vise à quantifier l'importance du changement thermique imposé par la déforestation dans une région du front pionnier de la marge méridionale de l'Amazonie brésilienne (région d'Alta Floresta au nord de l'État du Mato Grosso). Après

avoir présenté les conditions générales du bilan radiatif, nous décrivons la méthodologie mise en œuvre en 2007 et 2008 pour mesurer les différences entre forêt, pâturages et zone urbanisée et les principaux résultats obtenus à l'échelle mensuelle et quotidienne.

I. DÉFORESTATION ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AMAZONIE

On connaît le rôle essentiel joué par les forêts tropicales sur le système climatique, idée déjà ancienne puisque « au XVIII^e 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 in Roucou, 1997). 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 2 500 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). Tout changement dans la couverture forestière est donc susceptible d'avoir un impact sur le bilan radiatif et le climat à différentes échelles.

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, géographie et processus d'interactions simplifiés) a longtemps limité leur domaine d'utilisation à des simulations elles aussi simplifiées (déforestation totale du domaine tropical, modification d'un seul paramètre).

En Amazonie, 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 1) 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 également sur le ruissellement (Ichii *et al.*, 2003) surtout si on ne simule qu'une déforestation partielle...

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 longues séries de mesures (*in situ* et satellitaires) et la faible densité du réseau d'observation 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), 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

Tableau 1. Comparaison des résultats de simulation sur l'impact climatique régional d'une déforestation totale de l'Amazonie

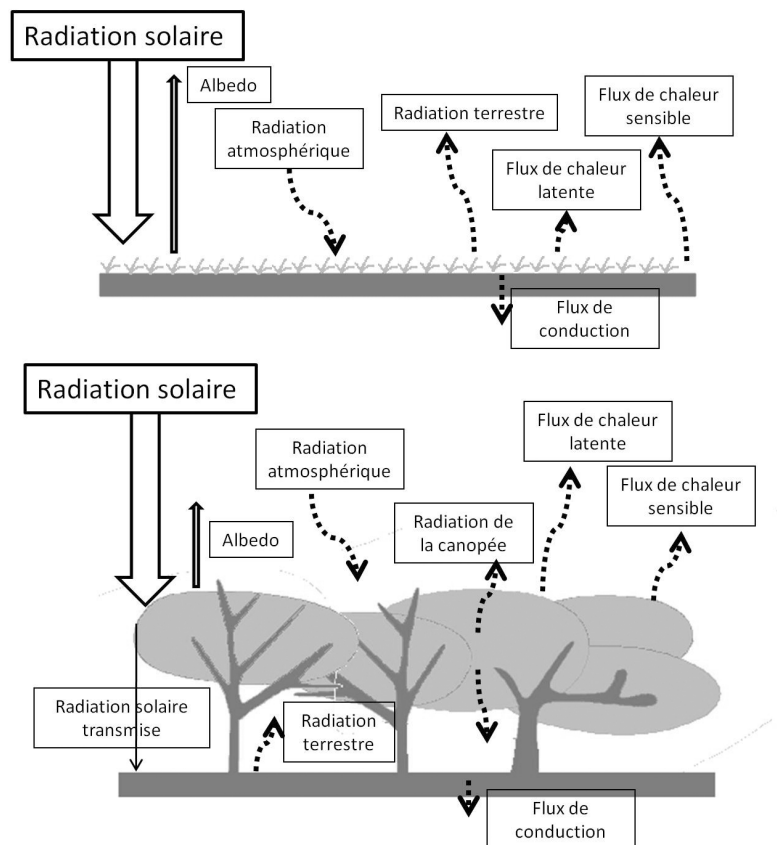
Référence	Dickinson et Kennedy (1992)	Henderson-Sellers et al. (1993)	Lean et Rowntree (1993)	Polcher et Laval (1994)	Sud et al. (1996)	Manzi et Planton (1996)	Lean et Rowntree (1997)	Hahmann et Dickinson (1997)	Costa et Foley (2000)
AGCM	CCM1	CCM1-OZ	UKMO	LMD	GLA	EMERAUDE	UKMO	RCCM2	GENESIS
Résolution	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 (SA) et la simulation (SI) pour :
 P : précipitations, E : évapotranspiration, ΔR : Ruissellement, ΔT : Température de surface
 avec $\Delta = SI - SA$ et $R = P - E$

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.

Finalement, les expériences de modélisation montrent que, faute de données de validation *in situ* valables et cohérentes, les résultats peuvent diverger rapidement. En outre le saut d'échelle entre les données locales et la modélisation globale est trop important et nécessite une meilleure compréhension des interactions sol-végétation-atmosphère dont la nature et l'intensité peuvent ne pas conserver des proportions identiques à des échelles différentes. Aux échelles régionales et fines, le forçage lié aux conditions de surface devient plus fort (Gandu *et al.*, 2004 ; Calvet *et al.*, 1997) et nécessite une prise en compte plus explicite dans la modélisation. Cependant, « la disponibilité des données avec le détail géographique nécessaire est actuellement la limitation majeure de la modélisation plutôt que la capacité de calcul ou de compréhension » (Bigot, 2004). En ce sens la résolution et la répétitivité des données satellitaires doivent permettre de fournir en entrée les données nécessaires aux modèles à condition que ceux-ci puissent aussi s'appuyer sur des mesures de références valides à l'échelle locale permettant de comprendre les différences de bilan radiatif entre surfaces défrichées et forêts.



Flux de courtes longueurs d'ondes en flèches pleines, de grandes longueurs d'ondes en tireté
 Source : D'après Pielke, 2001, modifié.

Figure 1. Schéma du bilan de surface au-dessus d'un pâturage (en haut) et d'une forêt (en bas).

Tableau 2. Synthèse du bilan radiatif moyen sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana. 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). En bas : idem pour la radiation infrarouge incidente (L_{in} , carrés) et émise (L_{out} , triangles) pendant la saison humide (c) et sèche (d).

	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

Relevés réalisés de 1999 à 2002 dans la région de Ji-Parana, Rondônia. L_n =radiation infrarouge nette ($L_{in}-L_{out}$).
Source : Von Randow *et al.*, 2004.

II. COMPARAISON DU BILAN RADIATIF ENTRE FORÊT ET PÂTURAGES

Pour quantifier l'amplitude du changement climatique dû à la déforestation à l'échelle locale et régionale, 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) 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-Paraná ; ces sites sont généralement constitués de doublons de tours de mesures en forêt et en pâturage, parfois également dans des secteurs de repousse (*capoeira*). 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.

Les mesures complètes réalisées dans le Rondônia vont permettre de comprendre comment, dans des conditions climatiques assez voisines de la région d'Alta Floresta,

s'expriment les différences observées entre la forêt et les pâturages (Figure 1). Le bilan radiatif global présente, d'abord, des écarts sensibles au-dessus des deux types de couvert. Celles-ci reposent surtout sur 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. Ce dernier 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 (Tableau 2, Von Randow *et al.*, 2004). En outre, alors que les flux de chaleurs sensible et latente varient peu au-dessus de la forêt (le rapport de Bowen 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 de continuer à assurer un flux comparable à la saison humide (Tableau 3). 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. À 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

Tableau 3. Valeurs moyennes des flux de chaleur sensible (H) et latente (λE) sur pâturage et forêt dans la région de Ji-Parana.

	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

Source : Von Randow *et al.*, 2004.

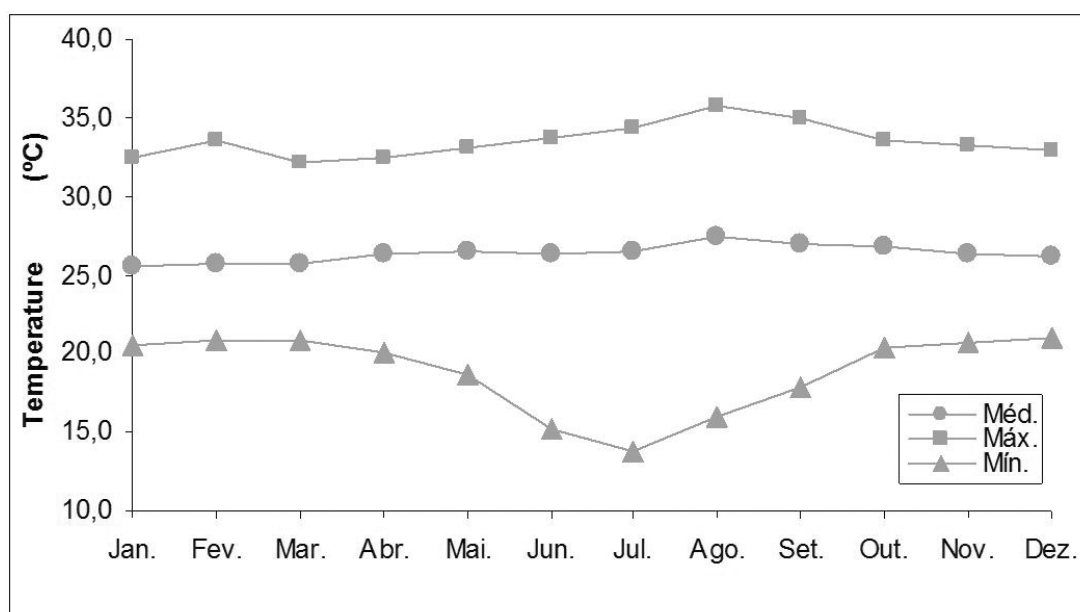
région défrichée. Enfin, pendant la saison sèche, l'intensité du flux de chaleur sensible sur les pâturages a pour conséquence d'épaissir la couche limite convective (CBL *Convective Boundary Layer*) d'environ 500 mètres supplémentaires par rapport à la forêt (Fisch *et al.*, 2004). Loin de rester confiné dans les basses couches, le changement de surface a donc des répercussions sur différents niveaux de l'atmosphère.

III. RÉGION D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE

Situé dans la partie méridionale de l'Amazonie brésilienne, l'État 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. 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. 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. Cédées à bas prix à la firme Indeco, les terres ont en effet rapidement été loties puis vendues à des propriétaires venus essentiellement du sud du pays (États 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 (près de 700 000 têtes de bétail). Avec 40 000 habitants, la ville d'Alta Floresta est devenue le centre

économique de l'extrême nord de l'État et un centre administratif et tertiaire (universités, hôpitaux, etc.) ainsi qu'une étape indispensable vers les nouveaux centres pionniers situés plus à l'ouest (Nédélec, 2005).

Cette mise en valeur, essentiellement agricole, a été conduite sans qu'aucune recherche climatologique préalable n'ait vraiment pu être menée (faute de données disponibles, les stations météorologiques étant installées au fur et à mesure de l'avancée du front pionnier). 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'État, 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. Les mesures réalisées à l'aéroport de la ville d'Alta Floresta - les seules données historiques de la région, analysées par Maitelli, 2007 - permettent de caractériser le climat de la région (Figure 2). Ainsi, les températures moyennes atteignent 26,3°C (33,5°C pour les maximales et 18,8° pour les minimales). La saison sèche (de juin à août) connaît les contrastes thermiques les plus marqués avec une moyenne des minima mensuels de 13,8°C en juillet et une moyenne des maxima mensuels de 35,8°C en août (Figure 2). Les précipitations (moyenne annuelle de 2 250mm) se caractérisent par un fort contraste entre la saison humide (plus de 300mm par mois en moyenne de décembre à mars) et la saison sèche (moins de 50mm de juin à août).

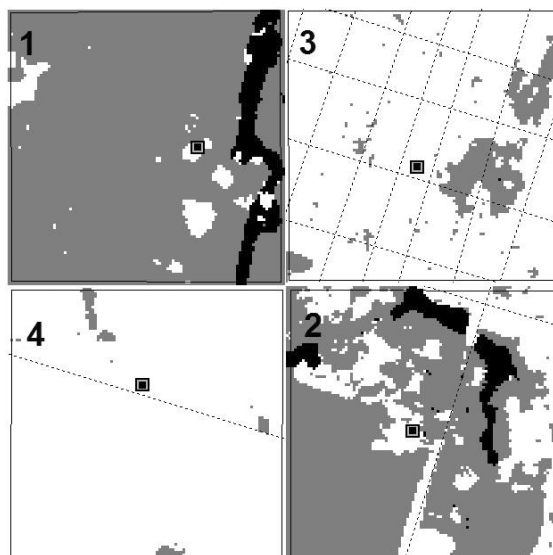
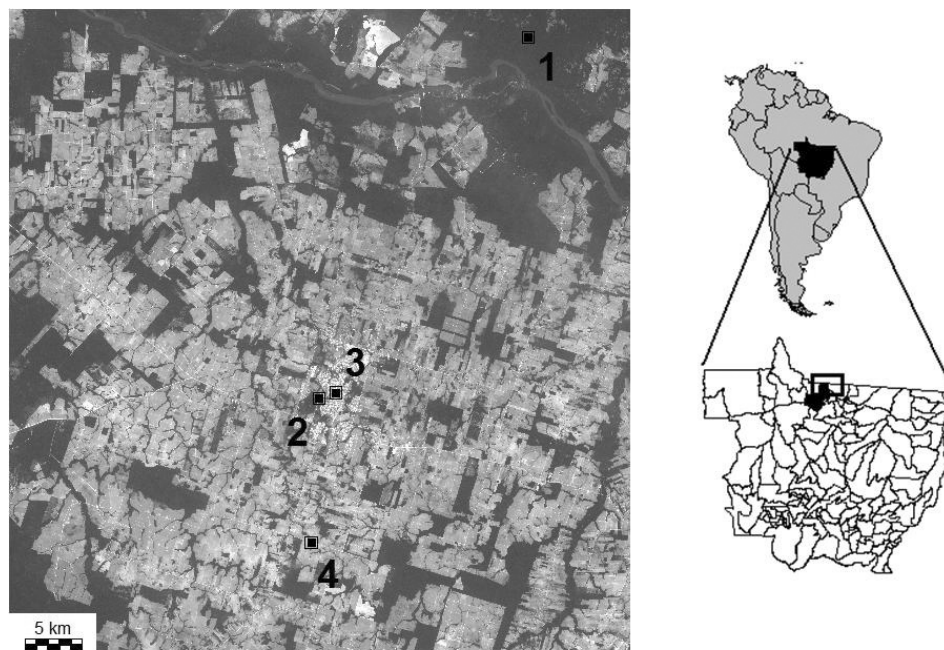


Source : Maitelli, 2007.

Figure 2. Températures moyennes, minimales et maximales mensuelles à Alta Floresta (moyennes 1994-2005)

Tableau 4. Pourcentage de l'occupation du sol autour des stations de mesures dans un cadre de 1x1 km (d'après la classification de l'image SPOT de 2007)

	Forêt	Défriché	Eau	Total
Parc Cristalino	88	5	7	100
Perimetrale Oeste	63	31	6	100
Radio (ville)	10	90	0	100
Sitio Aripuana	2	98	0	100



En haut : image SPOT du 8 août 2007 et localisation des 4 stations de mesure : la forêt apparaît en sombre, les espaces défrichés en clair

1 - Parc Cristalino (forêt)

2 - Perimetrale Oeste (secteur mixte défriché et forêt)

3 - Station Radio Band FM (centre ville)

4 - Sitio Aripuana (secteur en pâturages, entièrement défriché)

En bas : occupation du sol simplifiée dans un cadre de 1x1km autour des 4 stations de mesure :

Forêt en gris clair, surfaces en eau en noir, espaces défrichés (ou urbanisés) en blanc ; les lignes pointillées correspondent aux routes et pistes.

Figure 3. Localisation de la région et des sites de mesures

Pour préciser les conséquences climatiques locales de la déforestation, nous avons utilisé des mesures réalisées, entre 2006 et 2007, à partir de quatre stations Davis-WM2 fixes installées dans la région d'Alta Floresta (Figure 3). Le plus gênant pour ce type d'étude est l'impossibilité de trouver ici 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. À 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 (parc de 185 000 hectares créé en 2000 par l'État du Mato Grosso après de nombreux litiges avec les éleveurs des fazendas voisines) qui est situé à 36 kilomètres (à vol d'oiseau) de la ville d'Alta Floresta. Le site est encore largement boisé et constitue un des espaces forestiers les mieux préservés de l'État du Mato Grosso. Afin de caractériser l'occupation du sol autour de cette station, une classification a été réalisée sur une image SPOT-5 XS du 8 août 2007 à 5 mètres de résolution : les 3 classes retenues sont la forêt, les surfaces en eau et les surfaces défrichées. Cette opération a été réalisée dans un cadre de 1x1 km autour des 4 stations d'études (Tableau 4).

Pour comparer avec cette station en « forêt » nous avons ensuite choisi un site de mesure en plein secteur défriché mais dont l'occupation du sol est représentative de la mosaïque forêt-pâturages de la région. Situé à l'ouest de la ville d'Alta Floresta, ce site (perimétrale oeste) est également proche de l'aéroport dont les données ont servi à caler les mesures. Une troisième station a été

implantée en plein centre ville (à la station d'émission de la radio d'Alta Floresta) de manière à préciser également l'impact de l'urbanisation sur le climat à l'échelle locale. Bien que de taille modeste (40 000 habitants), des mesures antérieures effectuées dans cette ville ont en effet montré l'existence d'un îlot de chaleur urbain. Enfin, une quatrième station (dont les données ne seront que partiellement utilisées ici) a été installée plus récemment à 25 kilomètres au sud de la ville dans un secteur entièrement défriché (sitio Aripuana). Ces quatre stations sont situées à une altitude d'environ 200 mètres et dans un environnement topographique dégagé. Pour toutes ces stations, sauf la dernière dont les données ne sont disponibles que de mai à août 2007, nous présentons ici les résultats des mesures réalisées d'octobre 2006 à septembre 2007 soit une année complète de mesures de températures, humidité, pluie et vent.

IV. RÉSULTATS

A. Des contrastes thermiques surtout marqués pendant la saison sèche

Notons d'emblée que cette séquence de 12 mois a connu des valeurs proches des valeurs moyennes présentées plus haut : avec un peu plus de 2 300mm de pluie et une température moyenne annuelle comprise entre 26 et 27°C. Cette année peut donc être considérée comme représentative des situations climatiques de la région (Tableau 5). Les valeurs moyennes annuelles de températures montrent une différence entre les stations qui peut paraître modeste : l'écart n'est que de 0,4°C entre la forêt et les pâturages et atteint 0,7°C entre la forêt (plus fraîche) et la ville (plus chaude). On constate cependant que l'écart entre les stations est plus marqué pendant la saison sèche que pendant la saison des pluies (Figure

Tableau 5. Températures minimales, maximales et moyennes mensuelles à Alta Floresta d'octobre 2006 à septembre 2007 (+ précipitations au Cristalino)

Mois	Perimétrale (campagne)			Cristalino (forêt)				Radio (Centre Ville)			Sitio Aripuana		
	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Pmm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm
O	22.3	32.1	27.2	22.1	31.9	27.0	209	22.6	32.2	27.4			
N	22.4	32.0	27.2	22.2	31.3	26.8	267	22.5	31.9	27.2			
D	21.7	31.6	26.6	22.0	30.6	26.3	304	22.1	31.5	26.8			
J	22.5	31.5	27.0	22.8	30.5	26.6	377	22.7	31.5	27.1			
F	22.3	30.1	26.2	22.7	29.3	26.0	417	22.4	30.3	26.4			
M	21.9	31.8	26.8	22.4	30.6	26.5	428	22.3	31.7	27.0			
A	22.0	32.0	27.0	22.3	31.8	27.0	119	22.6	32.2	27.4			
M	20.5	31.7	26.1	20.9	30.8	25.9	28	21.3	31.7	26.5	20.6	31.4	26.0
J	18.1	33.6	25.8	18.1	32.4	25.3	26	19.7	33.3	26.5	18.9	33.4	26.2
J	18.1	34.5	26.3	18.0	33.4	25.7	81	19.7	34.4	27.1	19.2	34.1	26.7
A	17.9	35.2	26.6	17.2	34.2	25.7	29	19.8	34.9	27.3	19.2	34.9	27.1
S	20.2	34.1	27.2	20.4	33.7	27.0	43	21.2	34.1	27.7			

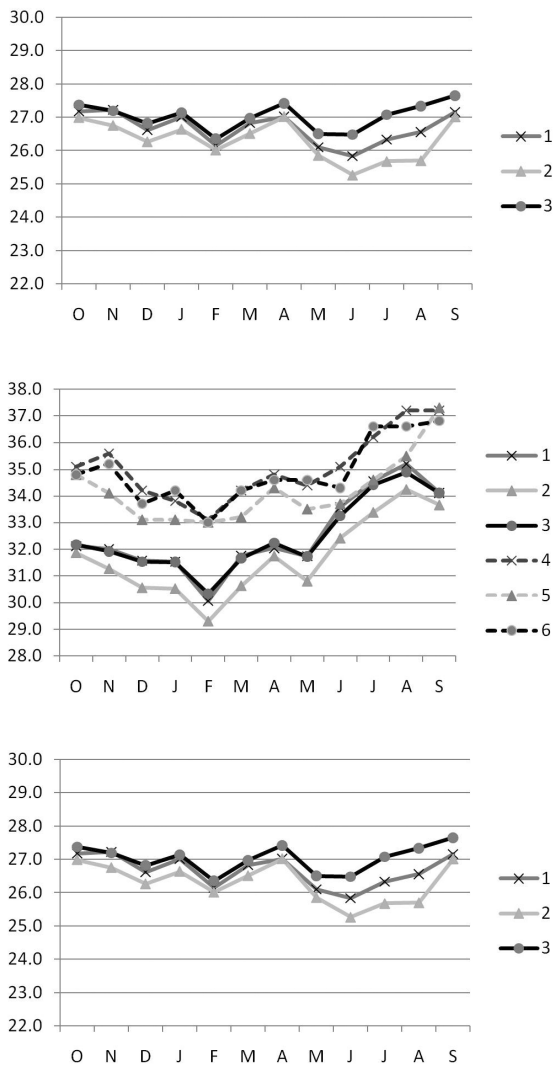
4A). En août, il atteint ainsi presque 1°C entre la campagne (26,6°C) et la forêt (25,7°C) et encore 0,7°C entre la ville (27,3°C) et la campagne ; au total l'écart moyen de température entre la ville et la forêt culmine donc à 1,6°C. En revanche, d'octobre à mars, les valeurs moyennes de températures varient entre elles de 0,3°C à 0,5°C.

Les températures maximales moyennes mensuelles sont également assez peu contrastées (Figure 4B). Les valeurs sont identiques entre la ville et la campagne (32,5°C) et légèrement plus basses en forêt (31,7°C).

Les contrastes sont plus marqués pour les températures minimales moyennes mensuelles, (Figure 4C). On oppose cette fois-ci la forêt et la campagne dont les valeurs

restent proches (20,8°C et 20,9°C) et la ville est plus chaude (21,6°C). L'écart, qui reste toujours très faible pendant la saison des pluies, augmente très nettement pendant la saison sèche : l'écart entre la ville et les autres stations dépasse alors 1,5°C ; il atteint même 2,6°C entre la ville et la forêt au mois d'août ! Alors qu'en ville, les températures minimales moyennes mensuelles ne sont jamais descendues en dessous de 16,4°C, elles ont atteint les 14°C en forêt au mois d'août.

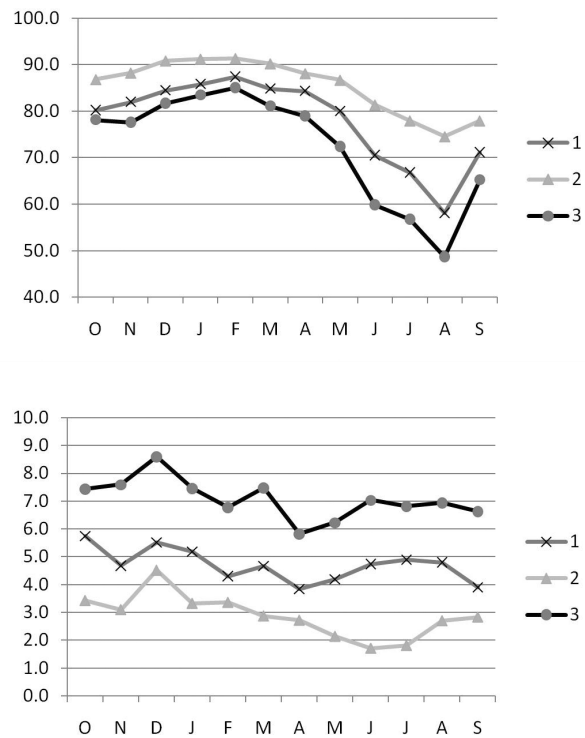
Les données d'humidité relative montrent des contrastes plus marqués également pendant la saison sèche. Ainsi en août, l'humidité relative moyenne est de 49% en ville contre 58% en campagne et 75% en forêt (Figure 5A). Dans le Rondônia, les mesures d'humidité spécifique sont respectivement de 15,8 et 13,4g/kg pour la forêt et les pâturages pendant la saison sèche (Von Randow *et al.*, 2004). Plus fraîche, la forêt reste également plus humide que les secteurs défrichés ou urbanisés environnants. Pendant la saison des pluies, même si la forêt reste plus humide que la campagne et surtout la ville, l'écart maximum reste inférieur à 10% (6% en février). Le vent (Figure 5B) est globalement plus fort en saison humide et surtout en ville (plus de 8 m/s en novembre) alors qu'il est très faible en forêt pendant la saison sèche (1,8m/s en juillet). En plus des effets radiatifs et évapotranspiratoires liés à la présence ou à l'absence de la végétation, la saison sèche est donc globalement favorable à l'expression de forts contrastes thermiques liés à l'occupation du sol en raison de la faible couverture



1 et 4 : Perimetrale (Campagne) ; 2 et 5 : Cristalino (forêt) ; 3 et 6 : Radio (ville)

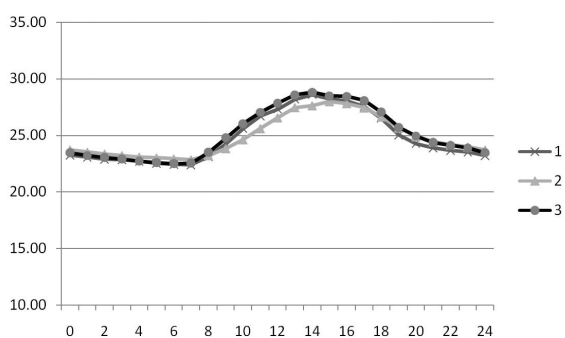
Lignes continues : valeurs moyennes ; lignes discontinues : valeurs absolues

Figure 4. Températures mensuelles moyennes (haut), maximales (milieu) et minimales (bas) à Alta Floresta d'octobre 2006 à septembre 2007



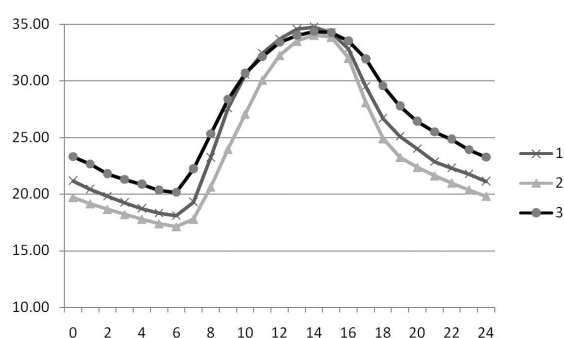
1 : Perimetrale (Campagne) ; 2 : Cristalino (forêt) ; 3 : Radio (ville)

Figure 5. Humidité relative mensuelle moyenne (haut), et vitesse moyenne du vent en m/s (bas) à Alta Floresta d'octobre 2006 à septembre 2007



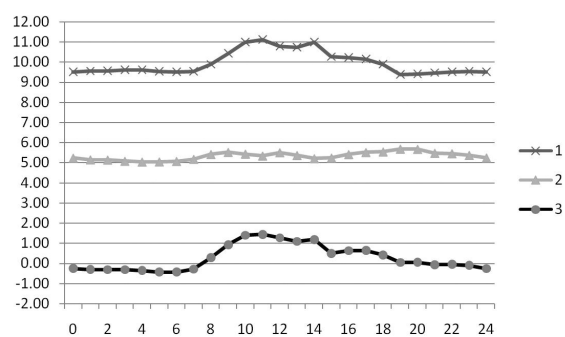
1 : Perimetrale (Campagne) ; 2 : Cristalino (forêt) ; 3 : Radio (ville)

Figure 6. Températures moyennes horaires en février 2007 à Alta Floresta



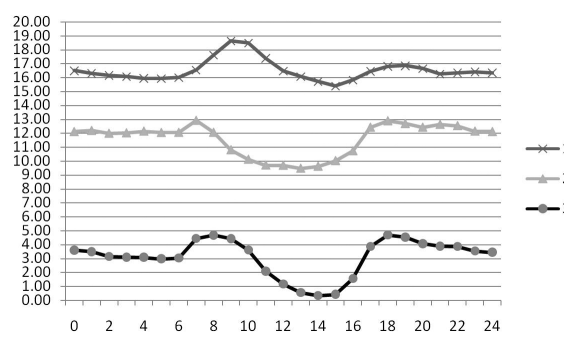
1 : Perimetrale (Campagne) ; 2 : Cristalino (forêt) ; 3 : Radio (ville)

Figure 8. Températures moyennes horaires en août 2007 à Alta Floresta



1 : Perimetrale (Campagne) - Cristalino (forêt) + 10°C
2 : Radio (ville) - Perimetrale (Campagne) + 5°C
3 : Radio (ville) - Cristalino (forêt)

Figure 7. Écarts de températures moyennes horaires en février 2007 à Alta Floresta



1 : Perimetrale (Campagne) - Cristalino (forêt) + 15°C
2 : Radio (ville) - Perimetrale (Campagne) + 10°C
3 : Radio (ville) - Cristalino (forêt)

Figure 9. Écarts entre les températures moyennes horaires en août 2007 à Alta Floresta

nuageuse, de la plus faible humidité relative de l'air et de la plus faible vitesse du vent.

B. Résultats : des contrastes thermiques variant au cours de la journée

Les relevés réalisés au pas de temps horaire vont permettre de préciser les variations thermiques diurnes entre les différentes stations. Pour ce faire, nous avons calculé les moyennes horaires des températures pour chacune des stations. Les mois de février (au cœur de la saison des pluies) et d'août (saison sèche) serviront à illustrer ces différences en fonction des saisons et des heures de la journée.

Les relevés climatiques des figures 6 et 7 montrent qu'en février - au cœur de la saison des pluies - la différence entre la zone forestière et les pâturages est très sensible en milieu de journée (de +0,9°C à +1,2°C de 10 heures à 14 heures locales). Les observations montrent des écarts souvent supérieurs à 4°C et même supérieurs à 6°C pour 4 journées. La nuit reste cependant plus fraîche d'un demi-degré sur les pâturages. Le flux de chaleur sensible observé en pâturage reste bien supérieur à celui observé

en forêt et il contribue à y maintenir, en cours de journée, des températures plus élevées. La différence entre la ville et la campagne reste modeste, mais elle est toujours en faveur de la première, le début de nuit connaissant l'écart le plus sensible (0,8°C de plus en ville qu'en campagne vers 20 heures). L'écart moyen entre la ville et la forêt montre le plus fort écart avec près de 1,5°C de plus en ville qu'en forêt vers 10-11 heures.

Au mois d'août, les écarts augmentent entre les stations et ce, quelle que soit l'heure de la journée (Figures 8 et 9). La forêt reste globalement plus fraîche que la campagne de jour comme de nuit. La différence est surtout marquée en début de journée (plus de 3° d'écart) et secondairement en début de nuit (un peu moins de 2° vers 20h). En début de matinée, alors que les pâturages se réchauffent rapidement, la forêt conserve une certaine fraîcheur. Malgré la plus grande turbulence de l'air dans la zone rurale (le vent reste toujours plus fort dans la campagne d'Alta Floresta) qui contribue à brasser et homogénéiser les basses couches, l'écart de température au bénéfice des pâturages n'est pas compensé. Tout se passe donc comme si la forêt contribuait à conserver plus longtemps que les pâturages la fraîcheur nocturne le matin et replongeait plus vite dans cette même

fraîcheur en début de nuit. La campagne se réchauffe beaucoup plus vite le matin et se refroidit un peu moins vite en début de nuit. Notons enfin que, pendant la nuit, les températures de la forêt deviennent de plus en plus basses (0,5°C à 1°C environ) qu'au-dessus des pâturages au fur et à mesure que l'on avance vers la saison sèche.

La différence de température entre la ville et la campagne trahit la présence d'un îlot de chaleur urbain sur la ville d'Alta Floresta. Celui-ci atteint 2 à 3°C en moyenne pendant la nuit, la valeur maximale étant observée en début de nuit lorsque l'émission de chaleur par les bâtiments est maximale (le pic de différence observé vers 8 heures correspond à une exposition au soleil légèrement plus précoce de la station urbaine par rapport à son homologue rurale). On peut également remarquer que pendant la journée, l'écart de température tourne à l'avantage de la zone rurale : vers 13 heures, il fait en moyenne 0,5°C de plus à la campagne. Mendonça et Dubreuil (2002) ont lié ce phénomène au fait que pendant la saison sèche la zone de pâturages est très peu couverte par la végétation (sols nus et herbes desséchées) alors que la zone urbaine est davantage arborée (jardins urbains, parcs et arbres le long des avenues). Ainsi le flux de chaleur latente reste un peu plus soutenu en ville tandis qu'en campagne le flux de chaleur sensible est plus élevé.

Enfin, l'écart entre la ville et la forêt devient très prononcé, notamment en début de nuit et en début de journée où il dépasse 4°C. Mis à part l'atténuation de milieu de journée (à peine 0,5°C d'écart) la ville reste systématiquement plus chaude que la forêt. On a ici la résultat de la plus forte diminution du flux de chaleur latente sur la ville qu'en forêt amplifiée par la plus forte restitution nocturne de la chaleur emmagasinée par les bâtiments pendant la journée. Au total, les changements d'occupation du sol dans la région ont donc provoqué pendant la saison sèche une hausse moyenne de plus de 2 degrés de l'écart de température entre la forêt et la campagne (surtout en début de journée) et entre la ville et la campagne (surtout en début de nuit) et de plus de 4 degrés entre la forêt et la ville.

CONCLUSION

Au total, le secteur défriché d'Alta Floresta apparaît toujours globalement plus chaud et plus sec (de 5 à 10% d'humidité relative) que la région forestière du Cristalino. L'écart de température est surtout marqué en journée où il atteint en moyenne près de 2°C mais il 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. Par ailleurs, 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 d'importantes fluctuations temporelles : l'impact du cycle végétatif de la végétation environnante varie en fonction de la période de l'année (saison sèche/saison humide et nuit/jour). Les conditions locales du bilan radiatif dépendant de l'occupation du sol influent 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.

Lors des projets de colonisation dont les processus d'urbanisation et de déforestation ont pris une grande ampleur, comme c'est le cas pour Alta Floresta, la transformation radicale de l'occupation du sol s'est donc 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 d'Alta Floresta et les campagnes voisines (comprise entre 2 et 4°C en moyenne) est donc comparable voire vraisemblablement supérieure aux valeurs moyennes observées dans le reste de la région 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. Ces données d'observation sont importantes pour caler/valider les résultats obtenus par la modélisation. Une étude antérieure à l'aide du modèle RAMS (Dubreuil *et al.*, 2001) montrait l'accroissement des températures et la baisse de l'humidité relative consécutifs à la déforestation. Ces expériences confirment la sensibilité des modèles aux paramètres sol et végétation et aux conditions d'échanges dans la couche limite liées notamment aux imprécisions sur la paramétrisation de la manière dont le couvert interagit avec les conditions d'humidité du sol.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes qui ont permis l'installation des stations météorologiques sur leur terrain et fourni une aide logistique à l'installation et à la maintenance des stations : Sa Dona Vitoria Da Riva (Hotel Floresta Amazonica et Cristalino Jungle Lodge), Claudio Vicenti (Fundação Ecologica Cristalino), Plinio Capilari (Cristalino Jungle Lodge), Zuleica de Melo (Sitio Aripuana), Rafael Labiak Olivastro et Eliane Aparecida Santana (Radio Band FM).

BIBLIOGRAPHIE

- 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*, 78 (1-3), pp. 157-175.
- 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 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- DEMANGEOT J. 1999. *Tropicalité, géographie physique intertropicale*. Paris : A. Colin, coll. U, 340 p.
- DUBREUIL V., PLANCHON O. & CAUTENET G. 2001. Déforestation et climat au Mato-Grosso : premiers résultats de modélisation climatique à méso-échelle dans la région d'Alta Floresta (MT-Brésil), *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, Séville, 13, pp. 304-310.
- DURIEUX L. 2002. *Étude des relations entre les caractéristiques géographiques de la surface et les nuages convectifs dans la région de l'arc de déforestation en Amazonie*, Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille I, 279 p.
- FISCH G., TOTA J. & MACHADO L.A.T. 2004. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), pp. 47-59.
- 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*, 78(1-3), pp. 97-110.
- 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*, 78(1-3), pp. 123-135.
- GASH J.H.C., NOBRE C.A., ROBERTS J.M. & VICTORIA R.L. (dir.) 1996. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester (UK) : John Wiley, 611 p.
- 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*, 78(1-3), pp. 177-185.
- ICHHI 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*, 24(22), pp. 4467-4479.
- LEAN J. & WARRILOW D.A. 1989. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342, pp. 411-413.
- MAITELLI G.T. 2007. Impactos da expansão da soja no clima da Pré-Amazônia Mato-Grossense, in Maitelli, G.T. e Zamparoni, C.A.G.P.(organizadoras), *Expansão da soja na Pré-Amazônia Mato -Grossense, Impactos Socioambientais*, EDUFMT, Entrelinhas, Cuiabá, 2007, pp.71-87.
- MARENGO J.A. 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), pp. 79-86.
- MENDONÇA F. & DUBREUIL V. 2002. L'étude du climat urbain au Brésil : État actuel et contribution de la télédétection, in *Environnement et télédétection au Brésil*, Presses Universitaires de Rennes, pp.135-146.
- NEDELEC V. 2005. *Modélisation de la colonisation agricole et de la déforestation dans le nord du Mato Grosso : approche multiscalaire par télédétection*. Thèse de Doctorat, Géographie, Université Rennes 2, 294 p.
- NIMER E. 1989. *Climatologia do Brasil*, IBGE, Rio de Janeiro, 421 p.
- NOBRE C.A., SELLERS P.J. & SHUKLA J. 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, 4, pp. 957-988.
- 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.
- POLCHER J. & LAVAL K. 1994. The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate, *Journal of Hydrology*, 155, pp. 389-405.
- 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 p.
- 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*, 78(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*, 38, pp. 1-11.

Source des images SPOT : Antenne de réception de Guyane, SEAS-IRD. © CNES 2008, Spot-Image
Images SPOT : Copyright CNES, 2007, Distribution
SISA Source : SEAS Guyane

Adresse des auteurs :

Vincent DUBREUIL,
vincent.dubreuil@uhb.fr
Hervé QUÉNOL,
herve.quenol@uhb.fr

Vincent NEDELEC,
vincent.nedelec@uhb.fr,
Jean François MALLET,
COSTEL UMR 6554 CNRS – LETG,
Université Rennes 2,
Place du Recteur H. Le Moal,
F-35043 Rennes CEDEX
Laurent DURIEUX,
Institut de Recherche pour le Développement,
Unité Espace S140,
Représentation de l'IRD au Brésil,
CP 7091 - Lago Sul, 71619 - 970 BRASILIA (DF)
laurent.durieux@ird.fr
Gilda MAITELLI,
Universidade Federal de Mato Grosso,
Programa de Pós Graduação em Geografia-Departamento de Geografia,
Avenida Fernando Corrêa da Costa, s/n° Coxipó,
CEP 78060-900 Cuiabá, Mato Grosso - Brasil
maitelli@terra.com.br