



HAL
open science

Le monitoring de la forêt amazonienne par télédétection

Moise Tsayem Demaze

► **To cite this version:**

Moise Tsayem Demaze. Le monitoring de la forêt amazonienne par télédétection. 2007. halshs-00315775

HAL Id: halshs-00315775

<https://shs.hal.science/halshs-00315775>

Submitted on 30 Aug 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.

LE MONITORING DE LA FORET AMAZONIENNE PAR TELEDETECTION

Moïse Tsayem Demaze

UMR 6590 CNRS ESO, équipe GREGUM, Université du Maine

Associé à l'IRD, US 140 ESPACE

Avenue Olivier Messiaen

75085 Le Mans cedex 9

Tél : 02 43 83 31 46 – Fax : 02 43 83 31 92

Moise.Tsayem_Demaze@univ-lemans.fr

Résumé

Cette note méthodologique¹ examine l'apport des images satellites et des photographies aériennes pour la caractérisation et le suivi de l'évolution des défrichements agricoles en forêt amazonienne. La réflexion présentée ici a pour objectif de proposer un vade-mecum pour la surveillance et la gestion de l'environnement forestier amazonien à l'aide de la télédétection. Dans cette optique, il paraît indispensable de trouver des solutions permettant de s'affranchir d'un certain nombre de difficultés qui limitent l'utilisation d'images satellites des régions tropicales humides. Nous proposons des pistes de solution à ces contraintes en partant de l'évaluation de l'apport et des limites des systèmes courants d'acquisition et de traitement d'images satellites. Les solutions préconisées portent essentiellement sur la détermination d'une fenêtre idéale d'acquisition d'images optiques et sur la fusion d'images multi-dates. Nous précisons ensuite les niveaux spatiaux de caractérisation et de suivi en nous basant sur les caractéristiques des images et sur l'emprise spatiale des phénomènes à surveiller. Le souci d'aboutir au suivi opérationnel appelle des recherches méthodologiques complémentaires et spécifiques en fonction de la nature et du rythme d'évolution des phénomènes qui affectent la forêt amazonienne et posent des problèmes d'aménagement du territoire et de gestion de l'environnement : défrichements agricoles, orpaillage, croissance urbaine, etc.

Mots-clés : télédétection, fusion d'images, forêt amazonienne, déforestation, Guyane française, Brésil.

Abstract

Monitoring Amazonian forest using remote sensing

This paper examines the contribution of the satellite images and the aerial photographs for the characterization and the monitoring of the evolution of the agricultural clearings in the Amazonian forest. The reflexion presented here aims at proposing a strategy for the management and the follow-up of the Amazonian forest environment using remote sensing data. In this way, it appears essential to find out solutions making it possible to avoid constraints and difficulties which limit the use of satellite images of the wet tropical areas. We propose solutions based on the evaluation of the contribution and the limits of current systems of satellite images acquisition and processing. These solutions relate on the determination of an ideal window of optical images acquisition and on the fusion of images of different dates. We specify space and scale levels of monitoring according to images characteristics and to the extent of the phenomena to be managed. The wish to lead to an operational monitoring system calls complementary and specific methodological research given the nature and the rate of evolution of the phenomena which affect the Amazonian forest and constitute problems of regional planning and management of forest environment: agricultural clearings, gold washing, urban growth, etc.

Keywords: remote sensing, image fusion, Amazonian forest, deforestation, French Guiana, Brazil.

¹ Elle est issue d'une thèse de Doctorat préparée au Laboratoire Régional de Télédétection de l'Institut de Recherche pour le Développement, centre de Cayenne en Guyane française, sous la co-direction de Laurent Polidori et Jean Marie Fotsing, soutenue le 12 décembre 2002 à l'Université d'Orléans. Mention très honorable avec les félicitations du jury à l'unanimité. Thèse disponible sur www.ird.orleans.fr

1. Cadre géographique

La principale caractéristique de l'Amazonie est l'omniprésence de la forêt dense qui s'étend à perte de vue, donnant l'impression d'un vide démographique, confirmé par la faible densité moyenne de la population : trois à quatre habitants au km². L'immensité du territoire, qui va de pair avec les difficultés d'accès, se conjugue avec une présence humaine relativement limitée, localisée essentiellement sur le littoral, le long des fleuves et des axes routiers. Il convient néanmoins de nuancer cette vision globale, car il existe une diversité de situations sous-régionales. Les grandes agglomérations du Brésil contrastent fortement avec les petites villes et les bourgs de la Guyane française. Cette dualité des échelles souligne la nécessité de recourir aux outils qui permettent un suivi multi-scalaire.

Sur le plan physiographique, on observe une variété de paysages amazoniens : forêt de terre ferme, mangroves, savanes, bas-fonds hydromorphes (*varzeas*). Au plan climatique, les longues saisons pluvieuses, et par conséquent les courtes périodes sèches (généralement 3 à 4 mois), ne sont pas propices aux acquisitions d'images de bonne qualité en particulier dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge. Ces caractéristiques biogéographiques et climatiques doivent être prises en compte dans la spécification des outils d'observation. Elles conditionnent la bonne utilisation des images à des fins de détection, de caractérisation et de suivi des phénomènes à surveiller.

La déforestation occupe le premier rang parmi ces phénomènes dont l'évolution en Amazonie est à surveiller par télédétection. Cette déforestation se déroule essentiellement sous forme de défrichements agricoles. Ceux-ci laissent dans la forêt des traces de dimensions très variables. Ces traces sont la transcription spatiale d'opérations d'occupation du sol, concertées ou non, dans un contexte foncier précaire, marqué par une forte demande en terres cultivables. Les choix politiques et les circonstances historiques et socio-économiques qui président au déroulement de ces opérations expliquent, au moins en partie, l'évolution spatio-temporelle des défrichements comme le montre le cas des abattis en Guyane française et celui des fronts pionniers au Nord du Brésil [TSAYEM, 2002]. Ces deux modes de colonisation agricole relèvent de logiques différentes et provoquent une déforestation d'ampleur différente. Les fronts pionniers au Brésil émanent initialement d'une volonté politique de « mise en valeur » ou de colonisation organisée de la forêt amazonienne, mais ils essaient par la suite et leur suivi devient difficile. Les abattis en Guyane française, bien que de petite taille, se multiplient généralement de manière non planifiée. Ces abattis étant très souvent spontanés et itinérants, le besoin de surveillance et de gestion de l'espace devient d'autant plus prégnant que le statut foncier est précaire et la demande en terres agricoles croissante.

Tous ces éléments du contexte social et spatial doivent être pris en compte dans la définition d'une stratégie à mettre en œuvre pour suivre par télédétection les atteintes à la forêt amazonienne. Pour qu'elle soit

efficace, cette stratégie doit s'appuyer sur des méthodes adaptées aux échelles spatiales et temporelles des défrichements et des autres formes d'occupation du sol, ainsi qu'à la réalité physiographique et climatique du milieu tropical humide. L'utilisation de la télédétection doit donc être en adéquation avec la réalité de terrain. Il est important de développer des solutions astucieuses et innovantes, fondées sur la connaissance des potentialités et des limites des différents systèmes d'acquisition d'images.

2. Apports et limites des systèmes courants d'acquisition et de traitement d'images

Toutes les données de télédétection (Tableau 1) présentent un intérêt pour la localisation, l'identification et la description des formes d'occupation du sol. Qu'ils soient visibles, infrarouges, thermiques ou radar, les différents capteurs fournissent des enregistrements qui concourent à l'observation de l'environnement. Toutefois, compte tenu des spécificités et des modes de fonctionnement de ces capteurs, l'expérience montre qu'aucun d'entre eux n'est en mesure de satisfaire à lui seul toutes les exigences d'un suivi opérationnel en milieu tropical. Une approche multi-capteur est donc fortement recommandée pour pallier les insuffisances et exploiter la synergie des différents systèmes d'acquisition d'images.

Fonctionnant dans le domaine des micro-ondes ou hyperfréquences, les capteurs radar ont pour atout majeur leur insensibilité aux conditions atmosphériques, ce qui permet d'obtenir des images de bonne qualité, même par mauvais temps comme c'est très souvent le cas dans les régions tropicales, et donc en Amazonie. En dépit de ce caractère « tout temps », l'imagerie radar ne permet pas de mettre aisément en évidence les différents types d'occupation anthropique du sol. Ainsi, malgré leur intérêt pour la surveillance de l'environnement tropical, l'interprétation de ces images nécessite des traitements préalables plus ou moins complexes. De plus, l'interprétation des images radar n'est pas aussi intuitive que celle des images acquises dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge [Tsayem et al., 2001].

Les capteurs optiques (Spot, Landsat, NOAA, etc.) ont l'avantage de fournir des données qui se prêtent à une interprétation aisée, enrichie par les synthèses additives des couleurs (compositions colorées). La reconnaissance du contenu des images se fait de manière confortable, en fonction de l'aptitude de l'œil à identifier les objets qui lui sont familiers (routes, maisons, parcelles défrichées), surtout lorsque les enregistrements sont effectués dans la partie visible du spectre électromagnétique [Polidori et al. 2001].

Les enregistrements effectués dans le proche et le moyen infrarouge présentent un intérêt considérable pour des applications en région tropicale, en raison de la sensibilité de ces longueurs d'onde à la réflectance des couverts végétaux [Baret et Bruno, 1994]. C'est en particulier le cas des rayonnements du proche infrarouge qui sont presque totalement réfléchis par la végétation, au contraire de ceux du rouge qui sont absorbés pour les besoins de la synthèse chlorophyllienne. La combinaison de ces deux types d'information accroît les possibilités de discrimination et d'identification des couverts végétaux : parcelles mises

en culture, forêts secondaire et dense, etc. Le pouvoir discriminant augmente lorsqu'on associe les mesures du rouge, du proche infrarouge et du moyen infrarouge dans des compositions colorées [Tsayem, 2002].

Quant aux photographies aériennes, leur grande résolution spatiale fait d'elles des documents adéquats pour une approche détaillée des objets géographiques sur un territoire. Elles sont utiles pour inventorier, quantifier et cartographier les parcelles d'abattis.

L'exploitation des données de télédétection passe par des traitements allant de la photo-interprétation aux classifications numériques (Tableau 2). Ces traitements sont indispensables pour mettre en évidence et caractériser l'environnement à un moment donné. Pour analyser l'évolution de l'environnement et suivre les dynamiques d'occupation du sol, il convient d'appliquer aux images des traitements visant à détecter et à quantifier les changements (Tableau 3).

Ces rappels dénotent de l'intérêt et de l'apport des enregistrements du visible et de l'infrarouge proche et moyen pour la détection et le suivi des empreintes anthropiques en forêt amazonienne, qu'il s'agisse des défrichements agricoles ou de toute autre forme d'atteinte à la forêt (extension urbaine, orpaillage, grands travaux, etc.). Cependant, la nébulosité quasi permanente réduit considérablement la probabilité d'acquisition d'images sans nuages par les capteurs optiques. Quelles solutions peut-on adopter face à cette situation ?

3. Trouver la fenêtre idéale d'acquisition des images dans le visible et l'infrarouge

Par fenêtre idéale d'acquisition, nous désignons la tranche de temps durant laquelle les conditions météorologiques sont propices à l'obtention d'images avec le plus faible pourcentage de couverture nuageuse (ciel dégagé).

En Guyane française par exemple, les nuages occupent constamment plus de 75% de la surface des scènes Spot (entre D et E dans la codification de Spot image). Pour éviter cet obstacle et exploiter au mieux les enregistrements effectués dans le visible et l'infrarouge, nous proposons d'explorer deux voies : l'utilisation d'images acquises au « moment idéal », et le recours à la fusion des données.

On choisit d'utiliser l'imagerie optique à condition qu'elle ne soit pas détériorée par les nuages. Cette condition dépend bien évidemment des saisons, mais surtout de l'heure de passage des satellites héliosynchrones. Ce dernier critère est immuable, étant lié aux contraintes orbitales des satellites. Les capteurs Spot acquièrent les images d'une même scène à 9h 30mn tous les 26 jours, avec possibilité de dépointage à plus ou moins 27° pour avoir une cadence de revisite de 2 à 4 jours, tandis que les capteurs Landsat effectuent les acquisitions à 10h 30mn (le ciel est parfois dégagé de nuages à ce moment là) tous les 16 jours¹. A ces heures, on peut raisonnablement espérer obtenir chaque année seulement une à deux images exploitables, c'est à dire ayant un taux de couverture nuageuse inférieure à 30 %. Au-delà de ce pourcentage, on estime que l'image n'est pas

exploitable, surtout pour le suivi des changements d'occupation du sol [Yanasse et al., 1997].

Une étude statistique précise les périodes adéquates pour obtenir en Amazonie brésilienne les images Landsat ayant une couverture nuageuse qui ne remet pas en cause leur utilisation [Asner, 2001]. Cette étude porte sur 54 179 images acquises de 1984 à 1997. Elle indique que la probabilité d'acquérir une image de moins de 30 % de couverture nuageuse est très faible entre décembre et mai, moyenne entre octobre et novembre, et élevée entre juin et août (Figure 1). Sur une base annuelle, les chances d'avoir une image d'excellente qualité augmentent, et il est alors probable d'obtenir une image ayant une couverture nuageuse de 10 % seulement (Figure 2).

Que ce soit à l'échelle mensuelle ou annuelle, les chances de bonnes acquisitions baissent énormément du Sud de l'Amazonie vers le Nord, et sont quasiment nulles à la latitude de la Guyane française, en liaison avec la forte nébulosité à proximité de l'équateur.

Cette étude statistique montre qu'avec les capteurs Landsat et Spot, il est improbable de surveiller l'environnement amazonien de manière opérationnelle sur une cadence mensuelle, voire saisonnière. Un rythme annuel paraît plus réaliste, même si à cette cadence de temps, il n'est pas certain d'obtenir des images exploitables sur l'ensemble de la région. Dans ce cas, il convient de trouver des compromis soit en se basant sur la complémentarité entre des capteurs différents, soit en fusionnant les images acquises par un même capteur à des dates différentes.

4. La fusion d'images

Elle consiste à combiner deux ou plusieurs images pour produire une nouvelle image enrichie par l'apport respectif d'images initiales. Ces dernières peuvent avoir été acquises soit par le même capteur, avec un intervalle de temps donné (fusion multitime), soit par des capteurs différents (fusion multi-capteur).

Les méthodes habituellement mises en œuvre pour réaliser les fusions comprennent la combinaison des canaux ou des néo-canaux, l'analyse en composantes principales, l'incrustation dans un SIG, la transformation des compositions colorées (RVB) en couches d'intensité, teinte et saturation (ITS), suivie de la transformation inverse ITS-RVB. L'analyse en composantes principales (ACP) et les transformations RVB-ITS-RVB, sont les méthodes les plus utilisées, surtout s'il s'agit de combiner les images fournies par des capteurs différents [Wade et al., 2001 ; Dupas et al., 2000 ; Muller et De Bethune, 2000 ; Mas, 2000]. Quelle que soit la méthode utilisée, il est indispensable, au préalable, de recalibrer géographiquement les images à fusionner. Les corrections géométriques et le ré-échantillonnage permettent d'avoir des pixels de dimensions identiques, de manière à rendre les images strictement superposables.

Pour éliminer les nuages et améliorer la qualité des images, nous avons testé deux types de fusion : la fusion multitime des images Spot 4 VEGETATION et la fusion multi-capteur (image Spot XS et photographies aériennes, images ERS-1 et JERS-1).

¹ il s'agit ici des heures solaires locales

4.1. Fusion d'images Spot VEGETATION en vue de remplacer les pixels nuageux

La cadence d'acquisition journalière de Spot VEGETATION offre la possibilité de disposer régulièrement de nombreuses images qui peuvent être combinées pour produire une synthèse dépourvue de pixels nuageux. L'approche consiste à utiliser les images acquises à des dates différentes, en faisant l'hypothèse que les nuages ne sont pas toujours aux mêmes endroits.

Des traitements ont été effectués pour éliminer les nuages sur une série d'images Spot 4 VEGETATION acquises en 2000 (Figure 4). Ces nuages sont supprimés à partir des seuils radiométriques établis dans les canaux du bleu et du proche infrarouge, l'analyse préliminaire de la série d'images ayant indiqué que ces canaux sont les plus sensibles à la couverture nuageuse. Les pixels nuageux de chaque scène sont remplacés par leurs homologues non nuageux des autres scènes. L'algorithme appliqué permet d'obtenir une image finale contenant le moins de pixels nuageux possible. Mais cette image finale est quelque peu détériorée par un bruit qui résulte de l'assemblage de pixels issus d'images acquises à des dates différentes. Améliorée et appliquée à la totalité des scènes Spot 4 VEGETATION de l'année 2000 sur la partie Nord-Est de l'Amazonie, cette méthode de traitement, suivie de la classification dirigée, permet d'élaborer une carte qui offre l'état global de la forêt et des atteintes qu'elle subit.

4.2. Fusions multi-capteurs pour améliorer l'interprétation visuelle des données

Le premier exemple concerne la localité de Saint-Georges de l'Oyapock en Guyane française. Cet exemple associe une image Spot XS du 29 février 2000 et une mosaïque de photographies aériennes de 1997 (Figure 5). Un intervalle de trois ans sépare les deux acquisitions. Après avoir réalisé une composition colorée de l'image Spot en associant les canaux XS4 en rouge, XS3 en vert et XS2 en bleu, nous avons transformé ces trois canaux en couches d'intensité, teinte et saturation. Au préalable, l'image Spot a été recalée géométriquement et ré-échantillonnée par rapport à la mosaïque de photos aériennes. Ensuite, la couche intensité a été remplacée par la mosaïque de photos aériennes (Figure 6). La transformation inverse des trois couches (photos aériennes, teinte et saturation) en composition colorée dans l'ordre rouge, vert et bleu (RVB), permet d'obtenir un produit fusionné enrichi de l'injection de la couleur (richesse spectrale de l'image Spot) et de la très grande résolution spatiale de la photographie aérienne. Ainsi, les structures spatiales impossibles à détecter sur l'image Spot initiale (bâtiments, pistes dans le bourg et aux alentours), sont facilement identifiables sur l'image finale qui offre un confort d'interprétation visuelle plus élevé que celui de la photo aérienne panchromatique.

Ce type de traitement permet par ailleurs d'effectuer une mise à jour de l'occupation du sol. C'est un avantage fortuit qui découle de la différence de dates. On remarque par exemple que les abattis récents (ceux qui ont été ouverts après la prise de vue aérienne) sont en rouge, tandis que les défrichements qui sont antérieurs à l'enregistrement satellite sont en blanc

(comme sur la photo aérienne initiale). Enfin, en dépit de sa qualité radiométrique qui n'est pas optimale, cette fusion de données fournies par deux capteurs de nature différente, constitue un moyen pour s'affranchir au moins partiellement de la couverture nuageuse présente initialement sur l'image satellite.

Le deuxième exemple de fusion multi-capteur porte sur les images radar de la localité de Charvein en Guyane française. Il s'agit d'images ERS-1 de 1993 et JERS-1 de 1995. Ces deux images ont été rassemblées dans une composition colorée associant l'extrait ERS en rouge et en bleu, et l'extrait JERS en vert. Le résultat donne une image couleur qui se prête plus aisément à l'interprétation visuelle par rapport aux deux images initiales considérées séparément (Figure 7). Les empreintes anthropiques (routes, défrichements agricoles, bâti) apparaissent en magenta, et la végétation en vert.

Tous ces exemples montrent que la fusion d'images multitudes et multi-capteurs améliore considérablement la qualité des données de télédétection du milieu tropical humide. Elle facilite l'analyse visuelle et la reconnaissance des fronts pionniers et des abattis, ainsi que le suivi de l'évolution spatio-temporelle de ces défrichements. Elle peut être intégrée dans une stratégie opérationnelle de surveillance et de gestion de l'environnement forestier amazonien comportant plusieurs niveaux spatiaux adaptés aux capteurs.

5. Niveaux spatiaux de surveillance et de gestion de l'espace par télédétection

5.1. Le niveau régional

Il englobe la quasi totalité des pays du bassin amazonien (Venezuela, Guyana, Surinam, Guyane française, Brésil) et est adapté à une observation générale qui permet d'appréhender les types de couverts végétaux (forêt dense, forêt secondaire, savanes, zones marécageuse) et les grandes structures spatiales (routes transamazoniennes, fleuves, barrages hydroélectriques). On peut suivre à ce niveau spatial l'évolution d'ensemble des fronts pionniers (Tableau 1 et Figure 4). Les données appropriées sont l'imagerie Spot VEGETATION ou NOAA AVHRR, en raison de leurs larges fauchées (environ 2500 km de côté). Ces images peuvent servir de support pour une veille satellitale compatible avec une cartographie à petite échelle (1/1000 000 à 1/10 000 000). Compte tenu de la faible ampleur des dynamiques d'occupation du sol à cette échelle, on peut envisager la surveillance à partir de la fusion d'une série annuelle d'images, avec une mise à jour tous les 3 à 5 ans¹.

Une autre possibilité de suivi à petite échelle consiste à utiliser les mosaïques d'images Landsat [WRI, 2006]. C'est la méthode qu'utilise l'institut national de recherche spatiale du Brésil (INPE) pour évaluer la déforestation en Amazonie brésilienne chaque année (Figure 8). D'un point de vue financier et technique, cette solution est très coûteuse et fastidieuse. Elle

¹ La fréquence journalière d'acquisition d'images NOAA AVHRR et Spot VEGETATION est largement suffisante pour ce type de traitement qui permet de supprimer les nuages et d'avoir une vue globale de l'Amazonie. Une station de réception d'images NOAA fonctionne au centre IRD de Cayenne et couvre toute la partie Nord de l'Amazonie. Spot-image fournit gratuitement les images Spot VEGETATION qui datent de plus de 6 mois

mobilise un personnel considérable et nécessite plusieurs centaines d'images pour couvrir toute l'Amazonie. De plus, il n'est pas certain qu'en rassemblant les images d'une année, on parvienne à réaliser une mosaïque d'images sans nuages, ce qui limite quelque peu le caractère opérationnel de cette procédure.

En identifiant les atteintes que subit la forêt amazonienne au niveau régional, on localise les endroits les plus touchés (fronts pionniers, zones d'abattis, grands travaux), ce qui permet de donner l'alerte et de déclencher le niveau de suivi approprié pour caractériser ces atteintes, c'est à dire le niveau sous-régional.

5.2. Le niveau sous-régional

Il convient à la gestion des bassins de défrichement repérés au niveau régional. Les données fournies par les capteurs Landsat et Spot sont adaptées à ce niveau scalaire qui est compatible avec une production cartographique à moyenne échelle (1/100 000 à 1/50 000). Les compositions colorées et les classifications numériques supervisées peuvent servir de support à la réalisation de ces cartes. La limite de résolution spatiale des capteurs Landsat et Spot, qui est maintenant de l'ordre de la dizaine de mètres, et même moins avec l'instrument HRG de Spot 5, est bien indiquée pour le suivi du parcellaire des fronts pionniers et des périmètres d'abattis.

Avec une périodicité de revisite qui varie de 16 jours pour Spot à 26 jours pour Landsat, on peut espérer, sur une année, obtenir une à deux images exploitables sur les sites d'intérêt. Le cycle de vie d'un abattis, généralement de 2 à 3 ans entre le défrichement et la mise en jachère, indique qu'une cadence de mise à jour de 2 à 3 ans est appropriée au suivi des bassins agricoles. Cet intervalle de temps est suffisant pour que les changements d'occupation du sol soient mis en évidence au travers de l'analyse diachronique d'images (compositions colorées multidates, classifications conjointes et disjointes, superpositions dans un SIG). La quantification de ces changements permet de préciser l'ampleur des mutations et de déclencher l'alerte en vue d'analyser de manière détaillée l'évolution des défrichements dans les localités les plus affectées [Tsayem, 2002].

5.3. Le niveau local

Il est indiqué pour le suivi des sites d'étendues très restreintes, lorsqu'il s'agit de faire des inventaires de parcelles et des états de lieux ou des diagnostics précis. La photographie aérienne est l'outil adapté à ce type d'analyse qui est compatible avec une production cartographique à grande échelle (1/50 000 à 1/5000). Cependant, avec des résolutions spatiales de plus en plus fines, les images satellites offrent maintenant l'opportunité d'accéder à ce niveau de détail. C'est le cas avec les images Spot 5, dont la taille du pixel en mode panchromatique varie de 2,5 à 5 m, avec la possibilité de fusionner les images panchromatiques et multispectrales pour avoir une image en couleur ayant les caractéristiques spatiales de l'image panchromatique. Le coût élevé et les longs délais de mises à disposition des missions aériennes, amènent à

privilégier les acquisitions par satellites, d'autant plus que la région amazonienne est très grande et sous-équipée en termes d'aérodromes, d'avions photographes et de capacités de traitement.

En fonction de l'acuité des besoins de suivi et de prise de décision pour la gestion des parcelles, des missions aériennes peuvent être ponctuellement effectuées, en complément de l'imagerie satellite. A ce niveau scalaire, la cadence de mise à jour de l'information dépend des décisions de gestion qui déterminent les types d'aménagement et d'utilisation des parcelles. Une base des données peut être mise en place, sous forme de SIG débouchant sur la production des statistiques et des cartes.

Cette stratégie de suivi que nous proposons s'inspire des traitements et des analyses que nous avons effectués sur les images satellites diverses ainsi que sur les photographies aériennes [Tsayem, 2002]. La priorité est accordée aux images optiques, en raison de la facilité et du confort de leur interprétation visuelle. L'importance de cette considération tient au fait qu'en situation de conflit lié au caractère spontané de l'occupation agricole du sol comme c'est très souvent le cas en particulier en Guyane française, l'image peut servir de pièce à conviction et de base de discussion/négociation entre les Services de l'Aménagement du territoire et les agriculteurs. Compte tenu des restrictions imposées par les conditions météorologiques à l'imagerie optique, il convient de recourir, le cas échéant, à l'imagerie radar dont on espère que les recherches en cours, portant notamment sur l'interférométrie, déboucheront sur des clés d'interprétation plus aisée et plus intuitive. Parallèlement ou en complément de la surveillance par télédétection, il existe des indicateurs qui peuvent renseigner sur l'état du couvert forestier. Il s'agit d'indicateurs de pression, d'état et d'incidence, conformément au cadre conceptuel suggéré par l'Agence Européenne de l'Environnement [Tsayem, 2002].

Conclusion

En Amazonie comme ailleurs dans les régions tropicales, l'insuffisance des données socio-économiques et environnementales régulièrement mises à jour contraste avec l'acuité des besoins de gestion de l'espace et d'aménagement du territoire. Face à cette situation, la télédétection se présente comme une solution permettant de disposer d'informations géographiques sans cesse renouvelées. Paradoxalement, c'est dans ces régions que l'acquisition et l'utilisation d'images satellites se heurtent aux plus grandes difficultés. Elles sont d'ordre économique (prix des images), technique (équipement limité), humain (manque de personnel), météorologique et spatial (couverture nuageuse, immensité du territoire, difficultés d'accès, rapidité des évolutions, diversités des types d'occupation du sol, complexité des phénomènes à suivre). La gestion et le suivi de l'évolution de l'environnement forestier amazonien par télédétection sont de plus en plus rendus possibles grâce à l'offre actuelle en images satellites, en photos aériennes et en méthodes de traitements numériques. La réflexion présentée dans cet article, appuyée par quelques exemples de traitements d'images, a permis d'envisager l'implantation en Guyane française d'un

observatoire de l'environnement amazonien¹. Des recherches méthodologiques ont été engagées au sein de l'IRD pour accompagner cet observatoire et le rendre opérationnel. Il nous semble important d'explorer des pistes de recherche consistant à établir des diagnostics environnementaux et socio-économiques à l'aide d'indicateurs issus des données de télédétection. A partir des traitements et analyses d'images, il s'agira par exemple de rechercher les attributs qualitatifs et/ou quantitatifs qui caractérisent un environnement, et de s'en servir pour diagnostiquer l'état de cet environnement et les conditions socio-économiques des populations qui y vivent. En d'autres termes, il sera question de trouver des passerelles (terrain d'entente) entre la télédétection (mesures par satellites) et les sciences sociales. Cela revient à relier les pixels à la société [Liverman et al., 1998]. Les résultats d'une telle recherche permettront par exemple d'utiliser pleinement la télédétection pour effectuer ou optimiser les recensements et enquêtes démographiques et agricoles, de sorte que le monitoring par télédétection ne se limite pas à un aspect purement géomatique, mais prenne aussi en considération les dimensions sociales et culturelles des empreintes anthropiques en forêt amazonienne.

Références

- Asner G.P., 2001. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n°18, p.p. 3855-3862
- Baret F., Bruno A., 1994. Intérêt du moyen infrarouge réfléchissant pour caractériser la végétation. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°136, p.p. 8-22.
- Dupas C.A., 2000. SAR and Landsat TM image fusion for land cover classification in the Brazilian Atlantic forest domain. *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, Part B1, p.p. 96-103.
- Global Vegetation Monitoring Centre, 2002. A vegetation map of South America. European Commission, Joint Research Centre, 34 p.
- Gond V., sous presse. Eastern Guiana shield land cover classification using SPOT-4/VEGETATION instrument.
- Liverman D., Moran E.F., Rindfuss S., P.C., (editors), 1998. *People and pixels. Linking remote sensing and social science*. Washington D.C., National Research Council, 244p.
- Mas J.F., 2000. Une revue des méthodes et techniques de télédétection du changement. *In Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n°4, p.p. 349-362.
- Muller F., De Béthune S., 2000. La fusion d'images. *In Bulletin de la Société Géographique de Liège*, vol. 38, n°1, p.p. 79-94.
- 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, p.p. 473-494. *In Le mercure en Amazonie. Rôle de l'Homme et de l'environnement, risques sanitaires* (coord. Scientifique : Carmouze J.P., Lucote M., Boudou A.), Paris, IRD Editions.
- Tsayem - Demaze M., Polidori L., Fotsing J.M., 2001. Caractérisation multi-échelle et multi-capteur de la déforestation tropicale amazonienne. *In 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 l'Université d'Orléans, 243 p.
- Wade S., Ndoye A., Mbaye M., 2001. Fusion d'images optique et radar : application à la cartographie du massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal oriental). *In TELEDETECTION*, vol. 2, n°2, p.p. 119-127.
- Yanasse C.C.F., Sant Anna S.J., Frery A.C., Renno C.D., Soares J.V., Luckman A.J., 1997. Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C, L and C data. *In Remote Sensing of Environment*, n°59, p.p. 180-190.
- World Resources Institute (WRI), 2006. Human pressure on the Brazilian Amazon forests. WRI Report, 86 p.

¹ C'est dans cette optique que le projet SEAS (Surveillance de l'Environnement Amazonien Assistée par Satellites) a été initié par l'IRD avec plusieurs partenaires (http://www.espace.ird.fr/04_fiche_seas_guyane.htm). Il a abouti à l'implantation à Cayenne d'une station de réception d'images satellites couvrant le plateau des Guyanes et l'Amazonie Nord. Le Programme DETER (Détection de la Déforestation en Temps Réel), mené par l'INPE depuis quelques années, utilise les images quotidiennes du capteur MODIS, ainsi que les images du capteur CBERS (capteur sino-brésilien) pour effectuer un suivi de la déforestation en temps quasi réel. Par ailleurs, l'INPE utilise les images Landsat pour mesurer la déforestation et son évolution annuelle.

	Capteurs/ Instruments	Résolution spatiale	Fauchées	Niveau scalaire d'observation	
Visible et infrarouge	AVHRR de NOAA	1,1 km x 1,1 km	2700 km	Régional : région amazonienne (1/1 000 000 à 1/10 000 000)	1
	VEGETATION de Spot 4	1,1 km x 1,1 km	2250 km	Régional : région amazonienne (1/1 000 000 à 1/10 000 000)	
	MSS de Landsat	56 m x 79 m	185km	Sous-régional : NW Guyane (1/100 000 à 1/200 000)	2
	TM et ETM+ de Landsat	30 m x 30 m 120 m x 120m	185 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	
	HRV et HRVIR de Spot	20 m x 20 m 10 m x 10 m	60 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	
	Spectroradio- mètres (CASI)	4 m x 4 m	2 km	Local (1/10 000 à 1/1000)	3
Radar	SAR (ERS-1)	26 x 30 m	100 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	4
	SAR (JERS-1)	18 m x 24 m;	75 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	
Photos aériennes	Chambres photogra- phiques	quelques dm à quelques m	dizaine de km	Local (1/5000 à 1/50 000)	5

1 : faible résolution spatiale ; 2 : moyenne et haute résolution spatiale ; 3 : très haute résolution spectrale ; 4 : micro-ondes (haute résolution spatiale) ; 5 : très haute résolution spatiale.

Tableau 1. Panorama des données de télédétection

Images satellites	Traitements	Résultats
NOAA AVHRR et Spot VGT	Approche analogique : photo-interprétation des compositions colorées	Partition forêt/non forêt, détection et identification globale des fronts pionniers, cartographie à petite échelle des zones déforestées
Images Landsat TM, Spot XS et Spot P+Xi, radar ERS et JERS	Approche analogique et numérique : compositions colorées agrandies, classifications dirigées	Caractérisation des fronts pionniers, détection, identification et caractérisation des abattis, calcul des surfaces défrichées
Photographies aériennes	Approche analogique et numérique : photo- interprétation, SIG	Caractérisation détaillée des abattis : états de surface, typologie, inventaire, cartographie, distribution spatiale, calcul des surfaces

Tableau 2. Données et méthodes pour le monitoring de la forêt amazonienne par télédétection

Méthodes techniques et	Avantages	Inconvénients
soustraction d'images ; division d'images	simples à mettre en œuvre	corrections géométriques et radiométriques indispensables, interprétation pas évidente de la nature des changements
vecteur de changement	la nature et le sens des changements sont identifiables	mise en œuvre complexe, corrections géométriques et radiométriques indispensables
compositions colorées multidates ; combinaisons de néo-canaux multidates (ACP, NDVI, IHS)	confort de l'analyse visuelle, repérage aisé des changements, corrections radiométriques dispensables, corrections géométriques relatives suffisantes, possibilité d'identifier la nature des changements	difficultés d'interpréter les variations d'intensité des couleurs, possibilité d'artefacts, sensibilité à la qualité des images, interprétation thématique pas évidente des néo-canaux (ACP, NDVI)
classifications synchronisées	visualisation et mesure des changements sur un seul document résultant de la fusion d'images multidates, informations sur l'amplitude des changements	longueur du temps de calcul due à la multiplicité des bandes associées, nature des changements parfois difficile à exprimer quantitativement, sensibilité à la qualité des corrections radiométriques et géométriques
classifications disjointes	corrections radiométriques et géométriques dispensables, identification de la nature des changements par comparaison simultanée, possibilité d'associer d'autres types de données dans le cadre d'un SIG	nombreux va et viens entre les classifications séparées, possibilité de démultiplication des erreurs

Tableau 3. Synthèse des méthodes de détection des changements d'occupation du sol par télédétection

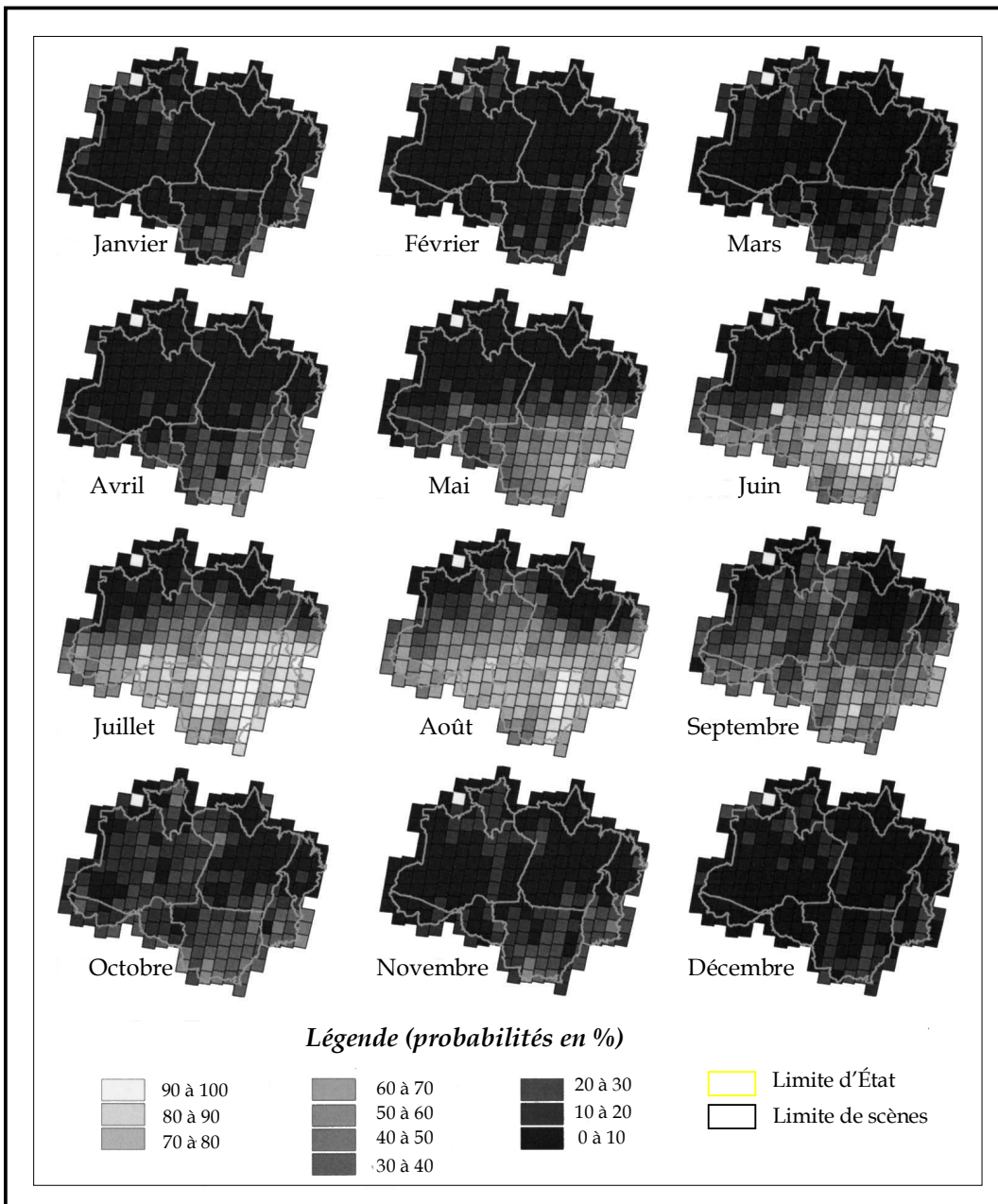


Figure 1. Probabilité d'acquisition mensuelle d'une scène Landsat TM avec une couverture nuageuse inférieure ou égale à 30 % en Amazonie brésilienne (d'après Asner, 2001)

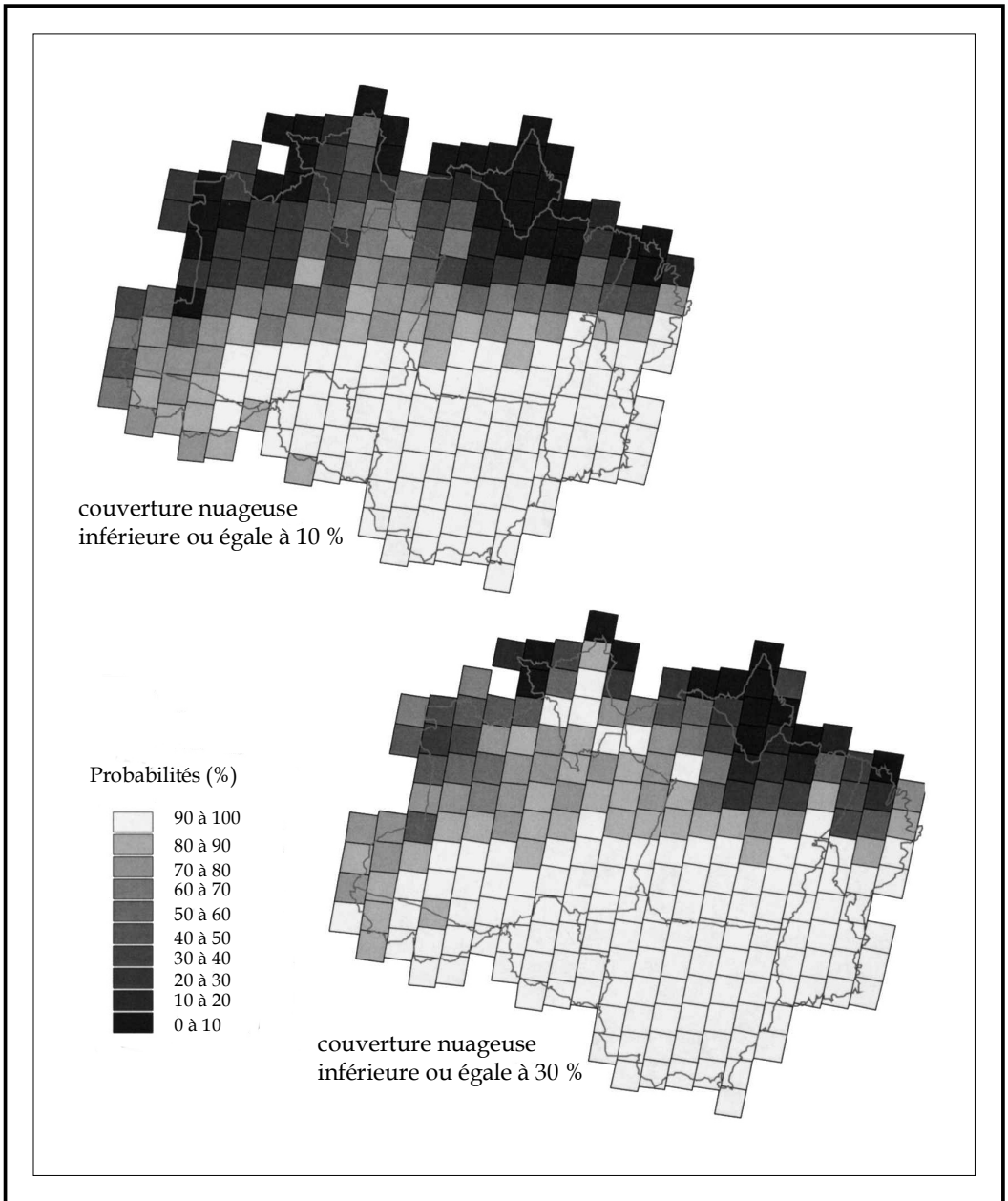


Figure 2. Probabilité d'acquisition annuelle d'une scène Landsat TM de couverture nuageuse inférieure ou égale à 10 % et 30 % en Amazonie brésilienne (d'après Asner, 2001)

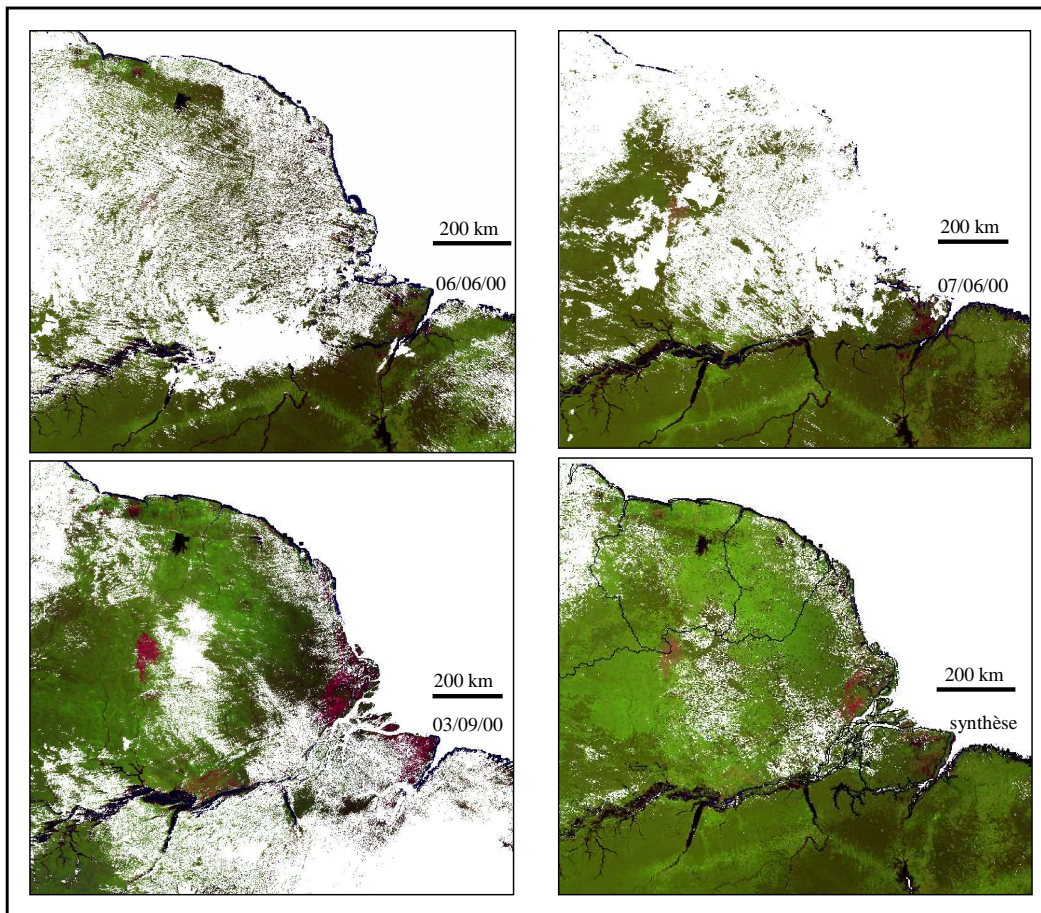
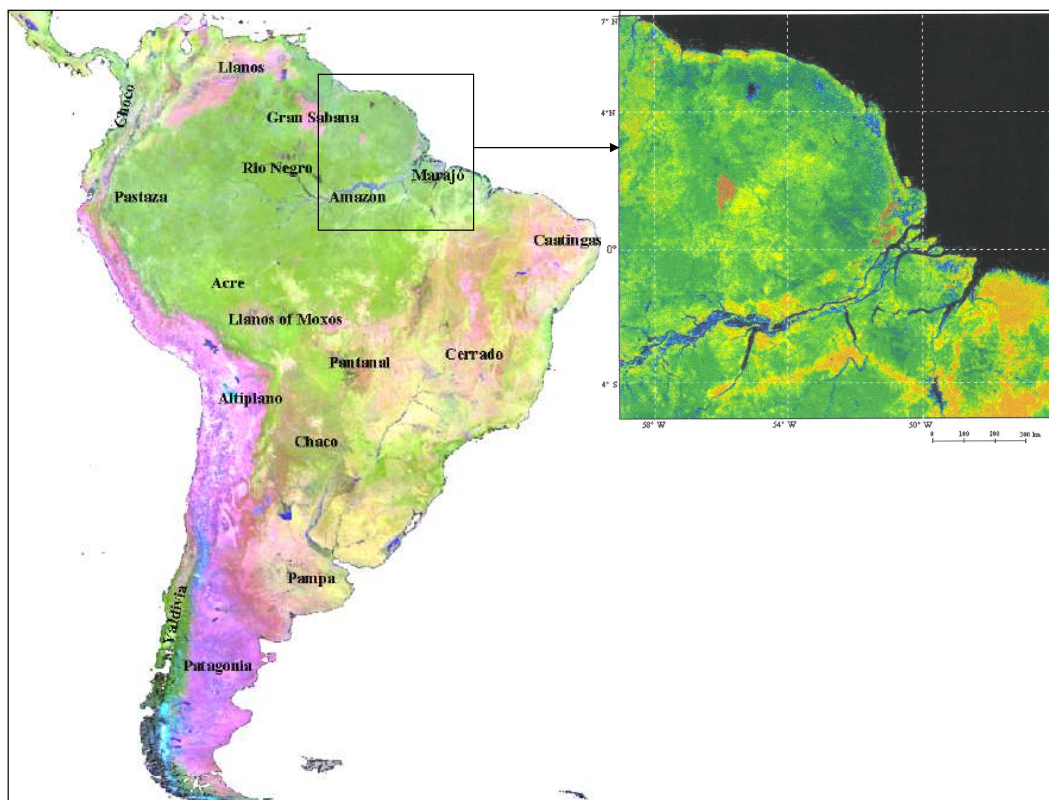


Figure 3. Synthèse multitime pour remplacer les pixels nuageux sur les images Spot 4 VEGETATION



4. Synthèse de la série d'images Spot 4 VEGETATION de l'année 2000 (Composition colorée à gauche et extrait à droite avec la déforestation mise en orange après la classification dirigée. Source : GVMC et Gond).

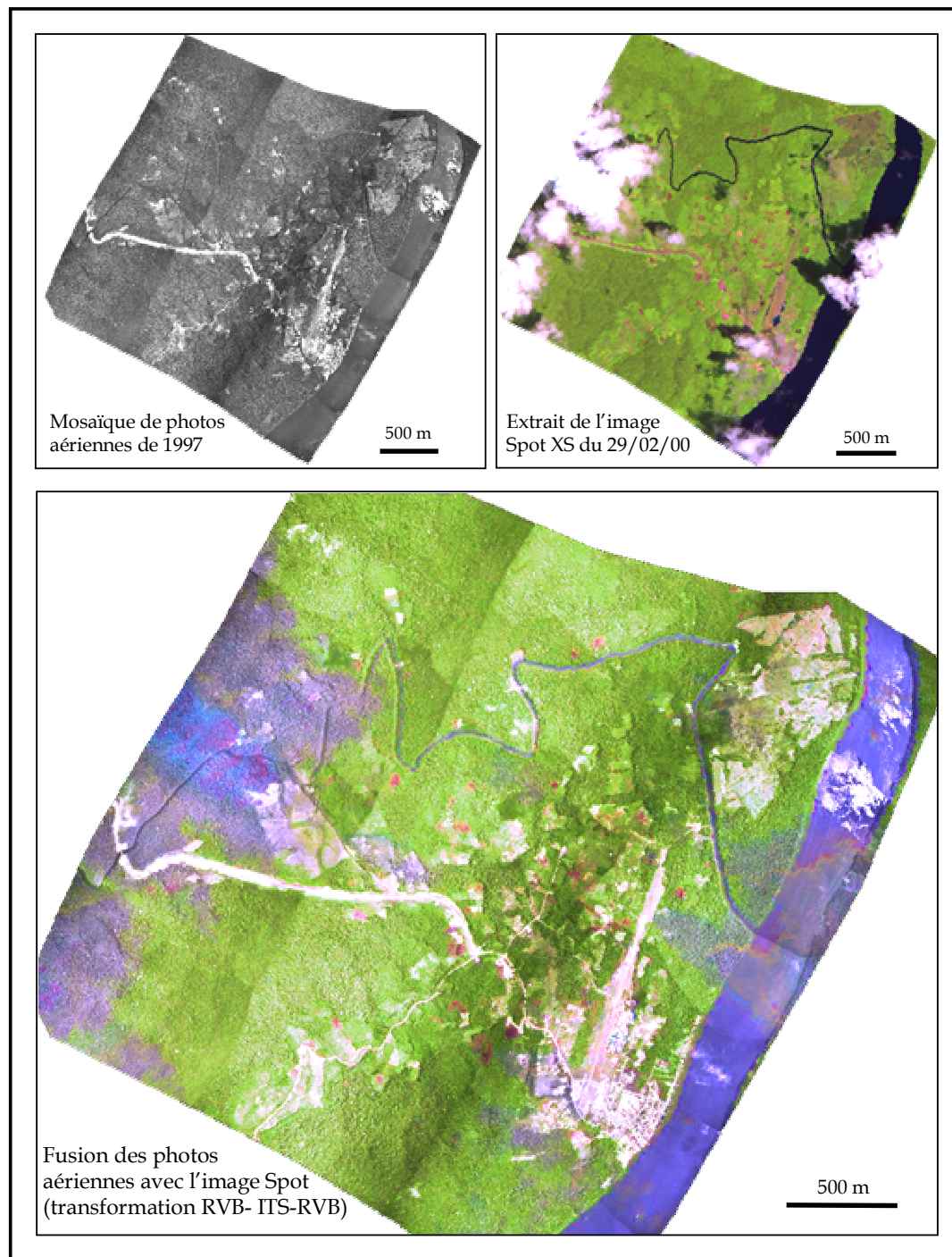


Figure 5. Fusion des photographies aériennes avec une image Spot XS pour améliorer l'identification visuelle de l'occupation du sol

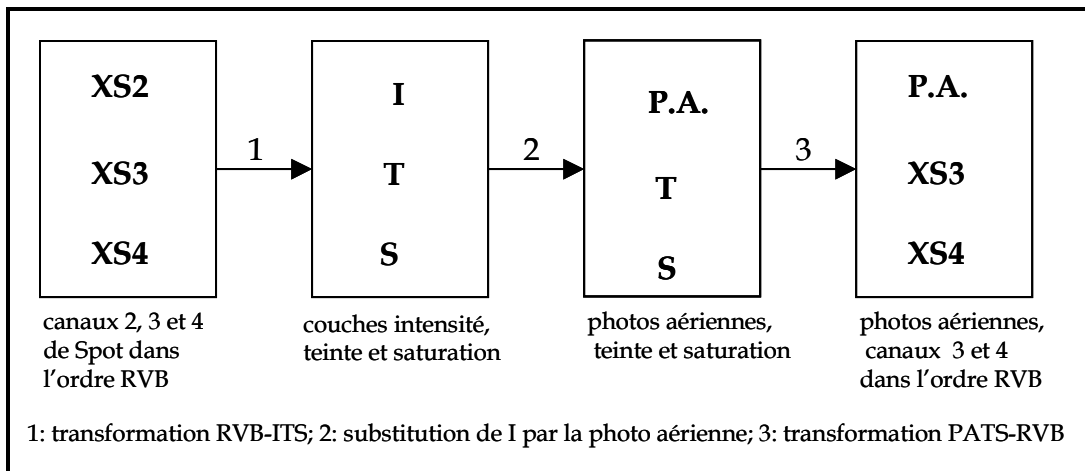


Figure 6. Méthode de fusion d'images par transformation RVB-ITS-RVB

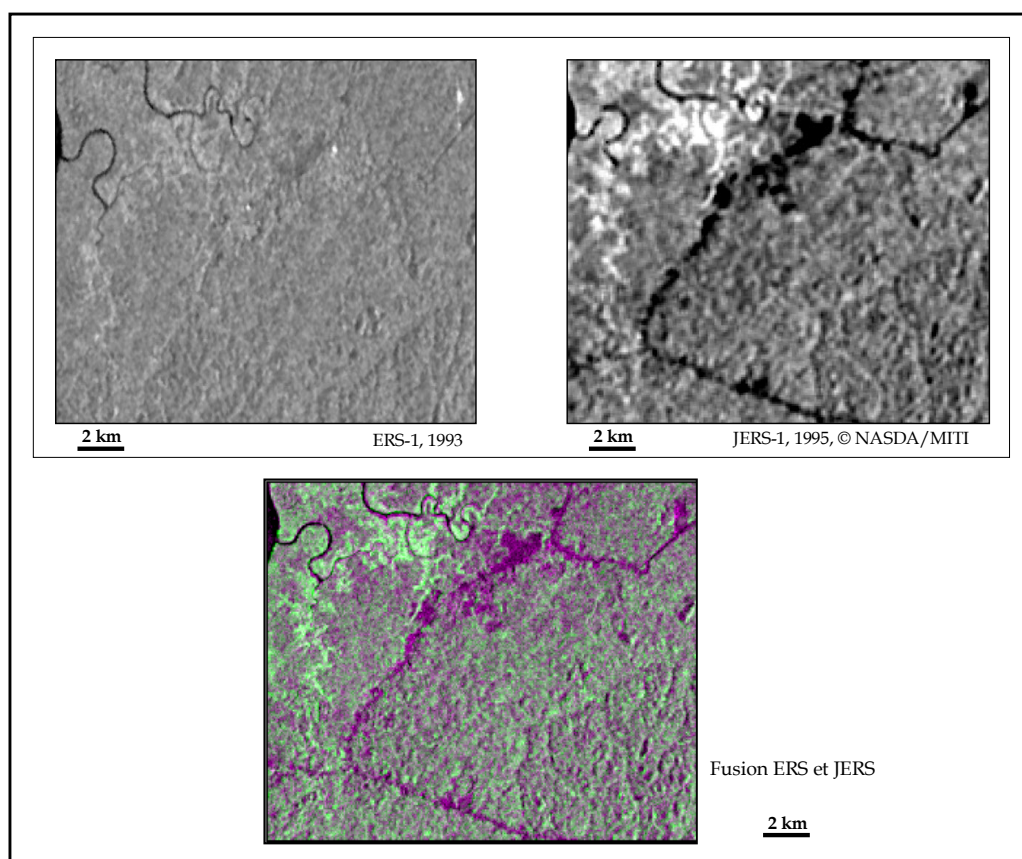


Figure 7. Fusion d'images radar pour améliorer la visu-interprétation de l'occupation du sol à Charvein

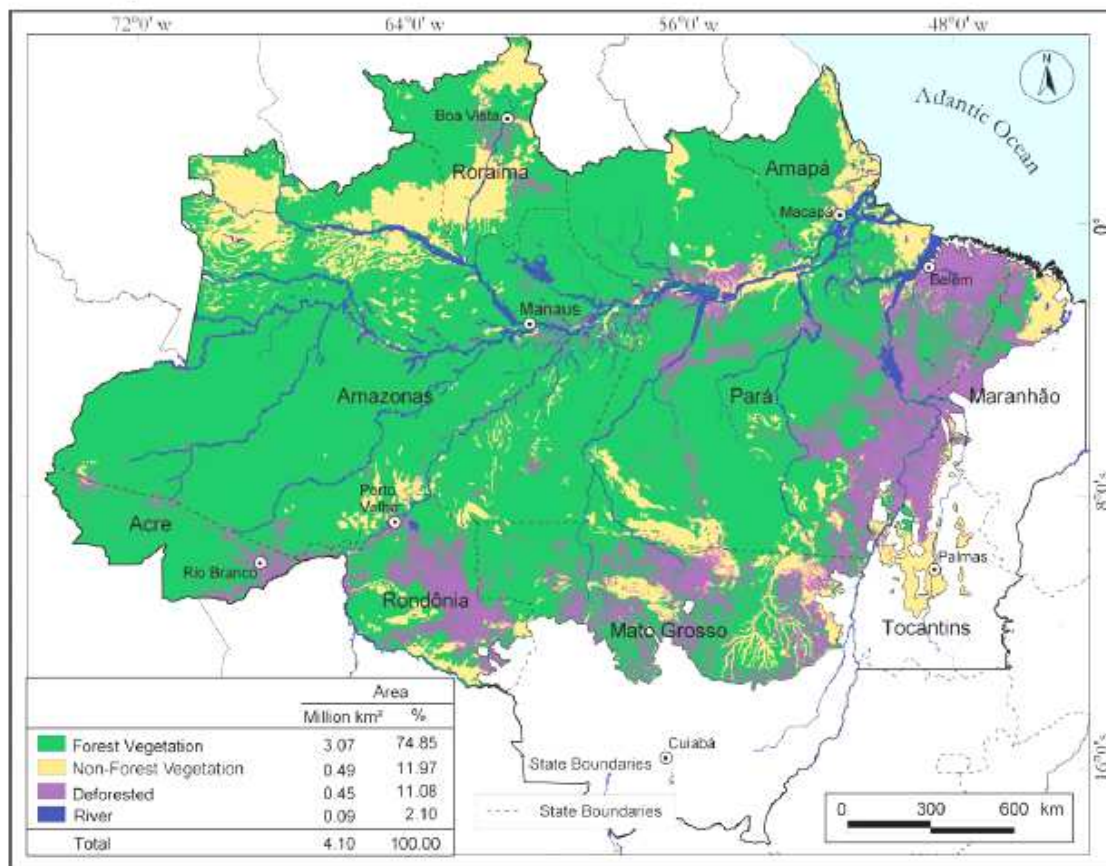


Figure 8. La déforestation en Amazonie brésilienne. Situation en 2001 cartographiée par télédétection (images Landsat) par l'INPE (source : Gobar Forest Watch)