HAL
open science

Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil

Moise Tsayem Demaze

To cite this version:

Moise Tsayem Demaze. Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil. Sciences de l'Homme et Société. Université d'Orléans, 2002. Français. NNT : . tel-00592532

HAL Id: tel-00592532

https://theses.hal.science/tel-00592532

Submitted on 12 May 2011

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.

UNIVERSITE D'ORLEANS
UFR Lettres, Langues et Sciences Humaines
Département de Géographie

THÈSE

Présentée

A L'UNIVERSITE D'ORLÉANS

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORLEANS

Discipline : Géographie-Aménagement-Environnement

Par

Moïse TSAYEM DEMAZE

CARACTERISATION ET SUIVI DE LA DEFORESTATION EN MILIEU TROPICAL PAR TELEDETECTION

APPLICATION AUX DEFRICHEMENTS AGRICOLES EN GUYANE FRANÇAISE ET AU BRESIL

Soutenue publiquement le 12 décembre 2002

MEMBRES DU JURY

Jean-Paul LESCURE	Directeur de Recherche IRD Orléans	Président
Jean-Marie FOTSING	Professeur Université d'Orléans	Directeur
Laurent POLIDORI	Chargé de Recherche – HDR IRD-LRT Cayenne	Codirecteur
Jean-Noël SALOMON	Professeur Université de Bordeaux 3	Rapporteur
Jacques HUBSCHMAN	Professeur Université de Toulouse le Mirail	Rapporteur
Giovanni Roberto VISIGALLI	Ingénieur Valorisation et Applications CNES Paris	Examinateur

N° attribué par la bibliothèque

IRD
Institut de recherche pour le développement
Unité ESPACE S 140

Centre National d'Etudes Spatiales

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Cette thèse sanctionne un parcours universitaire ponctué d'hésitations et de hasards heureux.

L'obtention du baccalauréat en 1990 m'ouvre les portes de la seule Université qui existe alors au Cameroun : l'Université de Yaoundé. Après avoir hésité entre le Droit, les Sciences Economiques, la Philosophie et les Lettres, j'opte pour une inscription en DEUG d'Histoire-Géographie. En troisième année d'Université (Licence), il faut à nouveau effectuer un choix : l'Histoire ou la Géographie. Malgré une certaine estime pour la Géographie que je trouve plus « scientifique », je m'inscris en Histoire et choisis la spécialisation Relations Internationales. Un mois après la rentrée universitaire, j'apprends qu'une spécialisation « Aménagement et Environnement » est proposée en Géographie. Les enseignements qui figurent au programme de cette spécialisation me paraissent très intéressants. Aussi, je renonce à mon inscription en Histoire et retrouve mes camarades en Licence de Géographie. Major de promotion, c'est logiquement que je suis retenu au cycle très sélectif de la Maîtrise. Paradoxalement, ma candidature n'est pas acceptée à l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé, malgré la qualité de mon dossier. J'étais tenté à ce moment là par l'enseignement secondaire qui était alors quasiment le seul débouché professionnel pour les « licenciés » de l'Université de Yaoundé. Cet échec m'a motivé davantage pour continuer les études universitaires, conforté que j'étais par le dicton « à quelque chose malheur est bon ».

La spécialisation Aménagement et Environnement suivie en Licence n'étant pas proposée en Maîtrise, je dois à nouveau opérer un choix, cette fois entre les nombreuses branches classiques de la Géographie. Je consens à m'inscrire en Géomorphologie, car les principaux enseignants de cette option, Paul Tchawa et Roger Ngoufo, prônent non plus la vision « pure et dure » de la géographie physique, mais une vision « globale et appliquée ».

Dès mon inscription en Maîtrise, ma curiosité scientifique me pousse à prendre de nombreux contacts dans le monde de la recherche scientifique, aussi bien au Cameroun qu'à l'extérieur. J'adhère à plusieurs réseaux internationaux de recherche dont le plus important me semble être le réseau EROSION de l'ORSTOM. A l'occasion du colloque que ce réseau organise en 1994 à Montpellier, je propose une communication écrite intitulée « Milieu physique, environnement humain et dégradation des sols en pays Bamiléké de l'Ouest du Cameroun ». Elle est publiée en 1995 dans le bulletin EROSION n° 15. Sans avoir jamais entendu parler de SIG, j'essaie dans cet article de juxtaposer, par une cartographie manuelle, les données physiques et socio-économiques pour expliquer les degrés de dégradation des sols en pays Bamiléké. En relisant cette contribution aujourd'hui, je me rends compte que j'étais déjà animé par un réflexe d'analyse et d'intégration spatiale.

Ce réflexe est encore plus évident dans le mémoire de maîtrise que j'ai rédigé en 1996 sous la direction de Paul Tchawa et Henri Bosko Djeuda. Le titre de ce document - *insertion spatiale et impact environnemental des boisements d'eucalyptus sur les hautes terres de l'Ouest du Cameroun* - est révélateur de l'option du novice géographe que j'étais à ce moment là : la prise en compte des échelles spatiales dans l'analyse des problèmes d'environnement.

En dépit de ma forte motivation pour poursuivre les études supérieures après l'obtention de la Maîtrise, je suis très vite confronté à plusieurs difficultés : le manque de moyens financiers,

l'enlisement des études doctorales au Cameroun, l'insuffisance de la formation, etc. Désormais, mon rêve est de décrocher une bourse pour continuer mes études à l'extérieur. Je multiplie les contacts dans les Universités françaises, allemandes, belges et canadiennes. Dans le contexte de crise économique qui sévit alors au Cameroun, il n'est pas évident de joindre les deux bouts. Henri Bosko Djeuda et Paul Tchawa me proposent de faire partie de leur équipe de recherche dirigée à l'Ecole Polytechnique de Yaoundé par Emile Tanawa. Des contrats occasionnels d'enquêteur et d'assistant de recherche me sont proposés dans le cadre des projets GEPRE (Gestion de l'Eau et Protection de la Ressource) financé par la Coopération française, et CES II (Conservation de l'Eau et du Sol) financé par la Coopération hollandaise. Parallèlement à cette activité de recherche, je dispense occasionnellement des cours, notamment dans les établissements privés.

Toutes ces occupations ne m'éloignent pas de l'Université. Aussi, dans la mesure du possible, j'assiste aux cours dispensés en première année de Doctorat à l'Université de Yaoundé, devenue Yaoundé I. Grâce à mes contacts avec la Représentation ORSTOM au Cameroun, et en particulier avec l'équipe du Docteur Alain Froment, j'entretiens une correspondance suivie avec les Responsables du DEA ETES (Environnement : Temps, Espace et Société) à l'Université d'Orléans. Lorsque j'obtiens le DEA de Géographie en 1997 à l'Université de Yaoundé I, ma satisfaction est décuplée, car je suis aussi admis au DEA ETES. Cependant, mon départ en France ne peut être effectué que si je bénéficie d'une bourse, les ressources financières de ma famille étant nulles, pour ne pas dire inexistantes. Au four et au moulin depuis Orléans, Alain Froment, relayé au Cameroun par Monsieur Michel Molinier, Représentant de l'ORSTOM, multiplient les correspondances notamment avec la Coopération française qui m'attribue finalement une bourse en octobre 1997.

Avec un mois de retard, je rejoins mes camarades du DEA ETES à Orléans. Mon intégration au groupe se passe sans problème. Mon ambition est de profiter de mon séjour en France pour acquérir une formation en télédétection et SIG. Dans cette optique, et en vue d'effectuer mon stage de DEA, je m'adresse à plusieurs laboratoires de télédétection. Monsieur Lescure me met en relation avec le Laboratoire Régional de Télédétection (LRT) du Centre IRD de Cayenne en Guyane française. Le Responsable du laboratoire, Frédéric Huynh, répond favorablement à ma demande.

Mon séjour en Guyane française, de mars à août 1998, est l'occasion de m'initier à l'informatique. Parti de zéro, mon stage de cartographie sur ordinateur se passe de commentaires au LRT à Cayenne. Encadré par Simon André, le travail consiste à analyser les dynamiques d'occupation du sol à partir des photographies aériennes. Je n'ai pas l'opportunité d'utiliser les images satellites au cours de ce stage. Ma formation se limite alors à la photo-interprétation assistée par ordinateur, et à l'élaboration d'un SIG avec le logiciel *AutoCad Map*.

Après l'obtention du DEA à Orléans en septembre 1998, je me rends à l'Université de Bordeaux 3 où je prends une inscription en Doctorat avec pour sujet de thèse l'étude de la dynamique des paysages dans le Nord du Cameroun. Encore un choix difficile, car j'ai dû décliner, du moins provisoirement, l'offre du LRT qui me proposait une thèse sur la Guyane, dans le prolongement de mon stage de DEA. Mon retour au pays natal s'avère insatisfaisant, et très rapidement je fais à nouveau face à de nombreuses difficultés : pas de prise en charge locale, chômage, isolement scientifique, pressions familiales, etc. Je décide de repartir du Cameroun. Grâce à une bourse en alternance de la Coopération française, j'obtiens un accueil de trois mois au laboratoire ERMES du Centre ORSTOM d'Orléans en 1999. De là, je reprends contact avec le laboratoire de télédétection de Cayenne qui me fait savoir que sa

proposition de thèse tient toujours. Nouvellement recruté en qualité de Professeur à l'Université d'Orléans, Jean Marie Fotsing m'aide à monter le projet de thèse proposé par Frédéric Huynh. Ce projet reçoit une subvention du CNES-CSG pour le financement de deux années d'allocation gérée par l'ORSTOM devenu IRD. Sous la direction de Jean Marie Fotsing, je prends une inscription à l'Université d'Orléans en novembre 1999, et en janvier 2000, je rejoins mon laboratoire d'accueil à Cayenne où je suis encadré au jour le jour par Laurent Polidori. Je me retrouve à nouveau en Guyane, et cette fois-ci pour une durée plus longue que celle du stage de DEA. Ce come-back est-il lié au fait que j'avais mangé le bouillon d'awara lors de mon premier séjour ? Oui sans doute !

Toujours est-il que j'ai mis ce temps à profit pour réaliser le travail qui fait l'objet de cette thèse. N'ayant pas antérieurement suivi un cursus universitaire comprenant une bonne dose de télédétection, j'ai dû commencer cette étude par l'apprentissage du traitement et de l'analyse d'images. La sympathie continue des camarades du LRT a considérablement facilité cet apprentissage sur le tas. Après cette phase, il a fallu concilier le traitement d'images avec le raisonnement et la démarche géographique. Cela suppose que les images et les méthodes d'analyses utilisées soient en adéquation avec les caractéristiques spatiales des objets d'étude. On retrouve ici la notion d'échelle dans l'étude des problèmes d'environnement. Au-delà des hésitations et des hasards qui ont rythmé mon parcours universitaire, cette prise en compte permanente de l'échelle est véritablement une constance dans tous les travaux de recherche que j'ai effectués depuis l'obtention de ma Licence en Géographie. Bénéficiant du double encadrement de Jean Marie Fotsing et Laurent Polidori, je ne pouvais que mieux prendre en compte cette notion chère aux géographes.

Cette recherche est avant tout une application de la télédétection aux problématiques liées à la gestion de l'environnement et à l'aménagement du territoire. Ce n'est donc pas une recherche fondamentale, ni en Géographie, ni en Télédétection. Face au « rush » des images satellites, mon souci est de conseiller les décideurs et utilisateurs dans le choix des capteurs et des méthodes de traitement d'images devant servir à surveiller la forêt amazonienne. L'étude a été conçue initialement pour répondre à une demande sociale : celle d'élaborer un dispositif de diagnostic et de gestion de l'occupation agricole spontanée appelée abattis en Guyane française. Il s'agissait en filigrane de montrer en quoi la télédétection peut être utile à ce territoire qui abrite le site de lancement de nombreux satellites dans l'espace. Cette problématique de départ a été revue et élargie au Brésil, ce qui a permis de prendre en compte les fronts pionniers et de situer la recherche dans le cadre plus global de la caractérisation et du suivi de la déforestation en milieu tropical.

Le travail n'aurait pu être conduit à bout si je n'avais bénéficié de soutiens divers. Aussi, je tiens à remercier toutes les personnes et tous les organismes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement du travail et de mon séjour en Guyane, si loin de mon pays natal et de ma famille.

C'est grâce à une subvention du CNES que j'ai commencé l'étude. Cette subvention, gérée par l'IRD, a financé deux années d'allocation de recherche (de janvier 2000 à décembre 2001). L'IRD a pris en charge la troisième année d'allocation, non sans difficultés. Ainsi, j'ai été amené à travailler sans bourse de janvier à août 2002. Cette période a été d'autant plus difficile à vivre que j'ai perdu ma petite sœur en mars 2002 au Cameroun. Suite à ce triste événement, mes responsables scientifiques et administratifs (Laurent Polidori, Jean Marie Fotsing, Frédéric Huynh, Georges Henri Sala), auxquels j'associe Madame Yvonne Vernon Salichon du Bureau des Missions et Voyages à la Direction de l'IRD à Paris, ont fait le nécessaire pour me permettre d'aller à l'enterrement et revoir la famille afin de me joindre à

elle pour évacuer la douleur. Ce geste inestimable, ajouté à la sollicitude constante de mes camarades de Cayenne et du LRT en particulier, a été très déterminant dans la poursuite et l'aboutissement de cette recherche, car le décès de ma sœur et ma situation financière catastrophique ont très sérieusement émoussé ma ferme volonté initiale. Je suis heureux d'avoir réussi à surmonter ces difficultés et d'avoir pu achever le travail dans le délai de trois ans prévu au départ. J'espère qu'il est à la hauteur des attentes et qu'il ne déçoit pas ceux qui m'ont aidé et soutenu dans cette entreprise harassante qu'est la préparation et la finalisation d'une thèse. En dépit de quelques tracasseries que je suis tenté de mettre sur le dos de certains individus, je suis reconnaissant vis à vis de l'IRD et de la Coopération française à Yaoundé, mais surtout vis à vis du CNES. Les efforts conjugués de ces trois organismes m'ont permis de partir du Cameroun, d'être accueilli au laboratoire ERMES à Orléans, et de réaliser ensuite cette étude au LRT à Cayenne.

Frédéric Huynh, Directeur de l'US 140 ESPACE de l'IRD, est le principal initiateur du projet duquel découle cette thèse. C'est lui qui m'a suggéré le sujet à la suite de mon stage de DEA. C'est également lui qui a proposé le projet au CNES-CSG et a obtenu de cet organisme la subvention qui a financé les deux premières années de mon allocation de recherche. Merci Fred, le chef d'orchestre.

Laurent Polidori a assuré très efficacement la tâche ingrate de suivre quotidiennement l'évolution du travail. Je lui dois en très grande partie la conception et la philosophie qui sous-tendent cette thèse. Sa clairvoyance, sa capacité à simplifier les choses complexes, ses conseils avisés, ses remarques pertinentes, en particulier sur les aspects télédétection, pèsent considérablement dans ce mémoire. Il a veillé à ce que je consacre tout mon temps à cette étude, et que je ne participe que de manière ponctuelle aux autres projets de recherche pour lesquels ma compétence a été sollicitée. Cette attitude très professionnelle est malheureusement rare de nos jours. Lauent Polidori s'est par ailleurs assuré que mon travail se déroule dans des conditions correctes : bureau, équipement, frais pour les tournées de terrain et les missions, etc. Il n'a pas hésité à m'aider à résoudre mes problèmes administratifs et financiers, allant jusqu'à m'avancer de l'argent personnel pour régler mes arriérés de loyer en attendant la reprise du payement de ma bourse. Je ne te remercierai jamais assez Laurent.

Mes rapports avec Jean Marie Fotsing sont l'illustration parfaite des hasards heureux que j'ai évoqués dès le début de cet avant-propos. Qui aurait pu imaginer que je ferais une thèse sur l'Amérique du Sud sous la Direction de Monsieur Fotsing ? En 1992-93, je faisais partie de ses étudiants à l'Université de Yaoundé au Cameroun. En Licence, il nous dispensais un cours de géographie régionale portant justement sur l'Amérique du Sud ! Je me permets dans cet avant-propos de dire que son ton trop professoral paraissait trop dure et trop sévère dans le contexte déplorable qui était le nôtre à l'Université de Yaoundé à cette époque là. Peu de temps après, son absence a très vite été remarquée à l'Université. Les rumeurs faisaient état de son départ en France. Ce départ a été ressenti notamment dans les groupes de Travaux Dirigés de Cartographie où sa rigueur et sa réputation étaient unanimement reconnues mais pas toujours appréciées par les étudiants avides de bonnes notes au détriment d'une formation de qualité.

Lorsque je me suis rendu en février 1998 à Montpellier pour faire une recherche bibliographique avant d'aller en stage de DEA en Guyane, c'est Monsieur Fotsing qui m'a accueilli contre toute attente au Centre IRD à l'Agropolis. Je ne savais pas qu'il s'y trouvait. Alors que je demandais à la réceptionniste de m'indiquer la bibliothèque de la Maison de la Télédétection, quelqu'un s'est retourné et m'a dit : mais on se connaît, qu'est-ce que tu fais

ici ? A ma grande surprise, c'était Monsieur Fotsing. Il se détendait entre deux cours de télédétection qu'il dispensait aux professionnels de la Santé. Il venait d'achever son Habilitation à Diriger les Recherches. C'est de manière fort sympathique qu'il m'a conduit à la Maison de la Télédétection et a commencé à s'intéresser à ce que je faisais. Cette rencontre a marqué le renouveau de nos rapports. Un an après, il a été recruté comme Professeur à l'Université d'Orléans où je venais d'obtenir mon DEA. C'est tout naturellement qu'il a été sollicité par Frédéric Huynh et par moi-même, et qu'il a accepté d'assurer la Direction de cette thèse.

On dit de Monsieur Fotsing qu'il est un professeur-né, trop exigeant et professionnel jusqu'au bout des ongles. Aussi, c'est avec une certaine appréhension que j'ai pris l'engagement de travailler avec lui. L'architecture de ce mémoire est le résultat de ses critiques incessantes mais pertinentes et toujours bien fondées et argumentées. En le fréquentant, j'ai appris beaucoup dans la rédaction scientifique. Il a effectué une mission à Cayenne en mai dernier, au bon moment, ce qui a permis de recadrer le travail et d'adopter le plan final de ce mémoire. Par ailleurs, le réconfort et l'aide financière qu'il m'a apportés pendant les moments difficiles, ont été très encourageants. Merci Professeur. J'espère que cette thèse va marquer le début d'une enrichissante collaboration.

Alain Froment est à l'origine de mon « entrée » à l'IRD. Dès nos premiers contacts au Cameroun en 1994-95, il a bien voulu m'aider à faire mon chemin. Il m'a toujours accueilli chaleureusement, d'abord à Yaoundé, puis à Orléans où nous nous retrouvons très souvent. C'est lui qui m'a informé et m'a encouragé à postuler au DEA ETES. Mon admission à ce DEA en 1997 constitue le véritable point de départ de l'aventure scientifique qui débouche aujourd'hui sur cette thèse. Nul doute que si j'étais anthropologue, j'aurais proposé à Alain Froment d'être mon patron scientifique. Dans le cadre de la gestion des séjours scientifiques que la Coopération française à Yaoundé m'a accordés au laboratoire ERMES du Centre IRD d'Orléans, Alain Froment, en tant que Responsable pédagogique de ces séjours, a toujours su intervenir en ma faveur auprès du CIES devenu EGIDE. Merci Alain, et merci aussi à Marie-Guy pour la sympathie jamais démentie.

Jean-Paul Lescure m'avait suggéré la piste de la Guyane française lorsque je cherchais un stage de DEA dans un laboratoire de télédétection en 1998. Je suis heureux d'avoir suivi cette piste et de revenir de ce Département français d'Outre Mer avec les connaissances rassemblées dans ce mémoire. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi Monsieur Lescure. Je suis très honoré par votre participation au jury de soutenance de cette thèse, ainsi que par celle des Professeurs Jean-Noél Salomon et Jacques Hubschman qui ont accepté d'évaluer ce travail en tant que rapporteurs. Je tiens en outre à remercier Monsieur Michel Mignot (Directeur de la Mission Guyane du CNES) pour le soutien apporté à cette étude, et Roberto Visigalli (CNES-Guyane Technopôle) qui me fait l'honneur de participer au jury.

Paul Tchawa est sans doute l'enseignant qui a le plus pesé lourd finalement, peut-être sans le savoir, dans mon orientation en Géographie. Fraîchement recruté en 1991 à l'Université de Yaoundé après l'obtention de son Doctorat à Bordeaux 3, il est revenu au Cameroun avec une vision renouvelée de la géographie physique. Cette vision a en quelque sorte révolutionné la pratique de la Géographie au Cameroun, en privilégiant l'étude des problèmes d'environnement et d'aménagement dans une approche globale et appliquée. Avec lui, on ne s'intéressait plus à la roche en tant qu'élément figé dans le paysage, mais en tant qu'élément-support participant à la dynamique de l'environnement. C'est toujours avec plaisir que je le rencontre et discute avec lui lors de mes passages au Cameroun. Merci Paul, pour tes encouragements sans cesse renouvelés.

Je remercie par ailleurs l'ensemble du corps enseignant qui a assuré ma formation de géographe au Cameroun, dans un contexte socio-économique et professionnel très difficile. Outre ceux que j'ai déjà cités, ces remerciements s'adressent aux Professeurs et Docteurs Jean-Louis Dongmo, Martin Kuété, Cornélius Lambi, Emmanuel Gwan Achu, Ngwa Nebasina, Maurice Tsalefac, François Kengne Fodouop, Roger Ngoufo, Dickens Priso, Gabriel Elong, etc.

Je vais compléter cette liste en mentionnant d'autres personnes qui ont pris le relais et m'ont soutenu et encouragé depuis mon arrivée en France : Yveline Poncet, actuelle Directrice du Centre IRD d'Orléans, Jean Paul Deléage, Responsable du DEA ETES devenu ADEn, Christian Moretti et Georges Henri Sala, respectivement ancien et actuel Directeurs du Centre IRD de Cayenne, Pierre et Françoise Grenand, Simon André, Christine Chauviat, David Huaman, Jocélyne Petit, etc.

J'adresse un merci spécial à la très instable mais toujours sympathique et dynamique équipe du LRT, à laquelle j'associe Marie Françoise Prévost (Fanchon), Florence Oussénie, Christophe Charron, Nicolas Gratiot, les autres camarades et collègues du Centre IRD de Cayenne, ainsi que toutes mes connaissances et amitiés de Guyane. Je n'ose pas citer les noms, au risque soit d'être très long, soit d'oublier certains. Je m'autorise cependant à citer Annelise Tran non seulement pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa sociabilité, mais aussi pour l'aide qu'elle m'a apportée dans la relecture du chapitre 3.

En France métropolitaine, je suis ravi de compter sur l'amitié des personnes parmi lesquelles Olivier Caillé, Marie-Noél Fotsing, Stéphane Peron, Barnabé Tchinda, Julie Serradeuill, Marie Cuq, Valérie Bernal et sa famille, Stéphanie Topoliantz, Mathieu André, Parfait Ahoyo, Coulibaly Amara, Jannick Bruneau, Yves Welapjuié, Pierre, M. et Mme Etoungou, Marie Pierre Bazan, etc.

Au Cameroun, je suis particulièrement reconnaissant envers ma famille « du village » et celle de Bertoua. Je sais que vous piaffez d'impatience et ne cessez de vous demander quand est-ce que je vais enfin terminer les études, me marier et commencer à travailler pour m'occuper davantage de vous. Je suis toujours conscient de cette perception africaine de la vie, même si j'ai intégré dans mon comportement quelques éléments de la culture occidentale qui me paraissent importants et pertinents dans la perspective de ce développement tant souhaité dans les pays du Sud. Aussi, à vous mes jeunes frères et sœurs, je souhaite que mon exemple vous motive, vous pousse à persévérer dans la vie et à tenter de vous prendre en main individuellement et collectivement. Merci à vous mes parents qui avez très tôt compris que la scolarisation et l'éducation sont des valeurs fondamentales pour l'épanouissement des individus et de la société.

Je ne sais comment remercier ma mère, elle qui m'a mis au monde. Elle n'a jamais été à l'école et je n'ai même pas réussi à lui expliquer ce que je fais comme étude, encore moins l'endroit où je me trouve dans ce qu'elle appelle le « pays des blancs », pour désigner tout pays autre que le Cameroun. Avec le recul, je me rends compte de tout ce que tu as dû enduré lorsque je suis parti de notre concession à 12 ans. Trois mois seulement après ce départ, tu es devenu veuve, et moi orphelin de père. Depuis lors, nous ne nous sommes plus jamais revus pendant plus d'une semaine. Je me souviens même qu'on a passé près de 7 ans sans se voir, entre 1983 et 1989, lorsque je suis parti à l'autre bout du Cameroun appelé « Beyrouth ». Même si je semble à présent gagné par la mondialisation, au sens propre du terme, je vais te revenir bientôt maman.

En Afrique, on dit que l'enfant appartient non pas à celui qui l'a mis au monde, mais à celui qui l'a élevé. C'est avec fierté que la famille Dountio m'a adopté et a fait de son mieux pour que je sois ce que je suis aujourd'hui.

Merci papa, merci mamans, merci mes frères et sœurs, tantes, cousins, cousines, nièces, neveux, etc. Que vous soyez au village, à Bertoua, à Bafoussam, à Dschang, à Douala, à Garoua, à Yaoundé ou ailleurs, vous avez toujours exprimé beaucoup d'estime et de considération à mon égard.

Alors que je vais bientôt passer cet ultime cap en soutenant ce travail, je me trouve à nouveau en situation comme le dirait Jean Paul Sartre. L'après thèse est incertain. Il va falloir être à l'affût des propositions, aussi bien en Afrique qu'ailleurs, tant dans l'enseignement supérieur que dans la recherche. Je serai sans doute encore amené à opérer des choix. Un grand merci à Valéry Gond qui m'aide déjà à trouver un post-doc en adéquation avec ma double volonté, d'une part de mettre mon savoir-faire au service de la surveillance et de la gestion des milieux tropicaux, et d'autre part de contribuer à la vulgarisation d'un raisonnement et d'une démarche géographique sous-tendus par l'utilisation de la télédétection et des SIG. Ceci passe nécessairement par une participation active à la recherche scientifique et à la formation des communautés d'étudiants et d'utilisateurs.

Nombreux sont ceux que j'ai oubliés de remercier. Pourtant, leur contribution n'est pas négligeable tant dans l'aboutissement de ce travail que dans la réussite du parcours que j'ai effectué jusqu'à présent. Ils se reconnaîtront lorsqu'ils auront l'occasion de feuilleter ce document. Qu'ils m'excusent pour cet oubli humain.

SOMMAIRE

Avant-propos et remerciements……..2
Sommaire……..9
Introduction générale……10

Chapitre 1- Les forêts tropicales : enjeux et évaluation des superficies……21
I. Forêts tropicales et préoccupations environnementales contemporaines…….21
II. Evaluations classiques des étendues de forêts et de la déforestation……25
III. Le recours à la télédétection pour améliorer les évaluations……..36

Chapitre 2- Complexité du phénomène géographique de déforestation en milieu tropical..45
I. Approches d'étude de la déforestation tropicale……..45
II. De la forêt « vierge » à la forêt défrichée : une évidence construite ?……53
III. L'amalgame sur l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis……..58

Chapitre 3- Les défrichements agricoles en forêt amazonienne : état des lieux……67
I. Les fronts pionniers au Brésil : un choix politique à l'origine……67
II. Les abattis en Guyane française : un grignotage de la forêt……73
III. Défrichements agricoles amazoniens et aménagement du territoire……97

Chapitre 4- Méthodes de caractérisation et de suivi des défrichements agricoles par télédétection…… 102
I. Du choix des capteurs et des niveaux d'analyse……..102
II. Méthodes de caractérisation des défrichements par télédétection……...111
III. Méthodes de détection des changements dans l'environnement forestier……..116

Chapitre 5- Mise en évidence et analyse de l'organisation spatiale des défrichements agricoles en Amazonie……..130
I. Détection et identification des défrichements de grande ampleur au niveau régional...132
II. Analyse des fronts pionniers et identification des abattis au niveau sous-régional……136
III. Caractérisation détaillée et cartographie des abattis au niveau local……150

Chapitre 6- Dynamiques des défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil…...162
I. Analyse des dynamiques spatiales au niveau local……..164
II. Mise en évidence de l'évolution des défrichements agricoles au niveau sous-régional.175
III. Evolution des défrichements agricoles au niveau régional……182

Chapitre 7- Veille aérospatiale pour le suivi des défrichements agricoles en Amazonie……188
I. Faire face aux contraintes de la surveillance de l'environnement amazonien par télédétection……189
II. Stratégie de surveillance et de gestion de l'espace par télédétection……202
III. Indicateurs complémentaires de perception et de suivi de l'environnement……...208

Conclusion générale……212

Références bibliographiques ……220
Sigles et acronymes……..234
Liste des figures……236
Liste des tableaux……238
Liste des planches photographiques……239
Table des matières……240

INTRODUCTION GENERALE

L'accélération du rythme d'accroissement de la population mondiale depuis la décennie 1970 suscite inlassablement la recherche d'une nouvelle approche de gestion des ressources de la Terre. A cet effet, des forums nationaux et internationaux se multiplient ici et là. Le rapport *Brundltland*, publié en 1988 par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement sous le titre *Notre avenir à tous*, constitue un des premiers éléments fondateurs de cette réflexion sur les capacités de notre Planète à satisfaire les besoins environnementaux actuels et futurs de ses habitants. La conférence des Nations unies tenue à Rio de Janeiro en 1992, baptisée « sommet de la Terre », a marqué un tournant décisif dans cette quête d'une gestion « à long terme » des ressources mondiales. Un groupe intergouvernemental spécial sur les forêts a été créé à la suite de ce sommet, et de nombreuses conventions ont été élaborées sur le climat et la biodiversité. C'est dans cette mouvance que les Nations unies ont organisé à Johannesburg en août 2002 une conférence internationale sur le « développement durable » . Même si les observateurs relèvent que les résolutions adoptées au cours de cette conférence sont globalement décevantes, force est de constater que les forêts tropicales ont occupé une place importante dans les débats[1]. Pourquoi ces forêts suscitent autant d'intérêt ?

L'évaluation du stock des ressources mondiales, ainsi que l'étude des menaces écologiques liées aux changements globaux, sont devenus des thèmes prioritaires pour la communauté scientifique mondiale. Dans ce contexte, les forêts, et en particulier celles de la zone tropicale, tiennent une place prépondérante, sans doute en raison de leurs fonctions écologiques réelles ou supposées : « poumons de la Planète », « réserves de biodiversité », « patrimoine génétique mondial », etc. Elles sont devenues l'enjeu d'âpres négociations géopolitiques. Pour les pays qui en disposent, les forêts tropicales représentent aussi une importante ressource dont

[1] *Le Monde* du 31/08/02, *Libération* des 30/07/02, 26/08/02, 05/09/02 et *Science et Vie* de septembre 2002.

l'exploitation procure des devises considérables. De nombreuses organisations non gouvernementales (ONG) et agences de coopération bilatérale et multilatérale ont réorienté leurs interventions en les focalisant sur la protection/préservation de ces forêts, parfois sans tenir compte du fait que depuis des milliers d'années, elles sont le cadre de vie de populations qui y pratiquent leurs activités de subsistance. Cette approche « conservationiste » est d'autant plus exacerbée que les régions tropicales sont souvent le siège de troubles sociaux et politiques qui entraînent des déplacements massifs de population. De plus, les besoins en terre s'y accroissent rapidement du fait de la forte croissance démographique et de l'urbanisation spontanée, ce qui augmente la pression sur les ressources et provoque la déforestation. Elle est indexée au sein du paradigme environnementaliste comme étant l'un des fléaux écologiques majeurs auquel la Terre est confrontée (Rossi, 2000). Mesurer les superficies concernées est devenu une préoccupation majeure des organismes de coopération internationale. Le sujet mobilise différentes catégories d'acteurs : chercheurs, experts, bailleurs de fonds, groupes de pression, associations de protection de l'environnement, médias, etc.

Au premier rang des institutions qui publient les statistiques sur la situation des forêts dans le monde, se trouve la FAO[2]. D'après ses dernières estimations (FAO, 2001a), la superficie forestière mondiale est d'environ 3,8 milliards d'hectares, soit 30 % de la surface de la partie émergée de la Terre. Les forêts tropicales représentent 47 % des forêts du monde, et se situent pour moitié (885 millions d'ha) en Amérique du Sud où le bassin amazonien, avec environ 0,6 milliards d'hectares, constitue à lui seul le tiers des réserves forestières tropicales de la Terre.

Durant la décennie 1980-1990, les forêts tropicales auraient perdu annuellement 15 millions d'hectares de leur superficie, soit un taux annuel de déforestation de 0,8 %. Entre 1990 et 1995, on a noté un léger ralentissement de ce rythme qui est passé à 0,6%, avant de connaître une accélération qui a ramené le taux de la décennie 1990-

[2] Food and Agriculture Organisation : organisme des Nations unies chargé de l'Agriculture et de l'Alimentation (N.B. la signification des sigles et acronymes est rappelée dans la liste qui figure à la fin de ce mémoire).

2000 au même niveau que celui de la décennie précédente. Si le pourcentage de déforestation annuelle a été relativement bas entre 1990 et 1995 en Amérique du Sud (0,6 %, contre 1,1 % en Asie et 0,7 % en Afrique), c'est sur ce continent qu'on a enregistré les plus grandes pertes annuelles de forêt (4,6 millions d'hectares, contre 3 millions d'hectares en Asie et 3,6 en Afrique).

Ces chiffres globaux fondés sur les inventaires forestiers nationaux des pays membres de la FAO, ainsi que sur les calculs d'experts, doivent être considérés avec précaution, car il s'agit de statistiques instantanées qui rendent compte de l'état des forêts à une date donnée, ce qui ne veut pas dire que les pertes quantifiées sont définitives ou irréversibles. D'une manière générale, la lecture attentive de l'abondante littérature sur la déforestation tropicale fait apparaître une grande variabilité des statistiques citées pour rendre compte de l'ampleur du phénomène. Il n'est pas rare de relever des contradictions d'une évaluation à une autre. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer cette situation : l'hétérogénéité des sources de données, les difficultés de collecte et d'harmonisation des statistiques, la diversité des méthodes d'analyse, le manque de clarté et de rigueur dans certaines procédures d'évaluation, l'imprécision du vocabulaire, etc. A ces éléments explicatifs, il convient d'ajouter l'absence d'une description préalable permettant de comprendre les mécanismes et les processus de déforestation et de reforestation, car dans bien de cas, après un laps de temps pouvant aller de la dizaine d'années au siècle, la forêt reconquiert les surfaces précédemment déforestées.

Toutes ces observations amènent à s'interroger sur la signification réelle des chiffres : à quoi correspond la déforestation ? Qu'est-ce qui est mesuré ? Qu'est-ce qui remplace la forêt lorsque survient le défrichement ? Autrement dit, quelle est la réalité géographique qu'expriment les statistiques sur la déforestation ?

Ces interrogations trouvent quelques réponses parfois vagues dans la littérature. Celle-ci pointe du doigt les défrichements agricoles comme étant la « première » ou la « principale » cause de déforestation en milieu tropical (Roppert et Roberts, 1999 ;

CGIAR, 1996). Sous l'appellation générique d'agriculture itinérante sur brûlis, on leur impute globalement 45 à 60 % de réduction du couvert forestier (Fleury, 2000 ; FAO, 1997). Ce faisant, l'agriculture itinérante pratiquée de manière traditionnelle par les populations autochtones est rangée dans le même registre que les défrichements en fronts pionniers opérés essentiellement par des migrants (Tsayem et *al.*, 2001). Cette situation est de nature à entraîner une confusion dans l'appréciation des causes véritables de la réduction des superficies de forêts tropicales.

Nos recherches antérieures en Guyane française (Tsayem, 1998), complétées par les observations ponctuelles au Brésil en novembre 2000, nous confortent dans l'idée que l'agriculture itinérante sur brûlis provoque une déforestation d'ampleur différente selon que les défrichements s'inscrivent dans une logique d'agriculture de subsistance ou d'agriculture commerciale, cette dernière nécessitant de grandes surfaces et/ou une productivité très élevée. Les défrichements itinérants en Guyane française, désignés par l'expression « abattis », découlent en grande partie de la première logique. Ils correspondent à une occupation agricole spontanée et momentanée, alors que les fronts pionniers brésiliens relèvent essentiellement de la deuxième logique. Dans ce second cas, il s'agit de colonisation agraire et pastorale opérée initialement dans le cadre d'une volonté politique de « mise en valeur » de l'espace forestier.

Ces considérations suggèrent que la déforestation tropicale est un phénomène géographique dont les traductions spatiales varient en fonction du contexte politique et de la nature des rapports entre les groupes sociaux et les forêts. De plus, même si elle est un fait indéniable, elle s'avère difficile à cerner avec précision, ainsi que le montre la divergence des évaluations de superficies forestières défrichées. Ces remarques soulignent la difficulté d'un suivi véritable de l'évolution spatio-temporelle de la déforestation en milieu tropical. Comment et avec quels outils quantifier de manière fiable l'extension du phénomène ?

Parallèlement aux inventaires forestiers effectués par les pays membres de la FAO, l'acquisition d'images par les satellites d'observation de la Terre depuis le début des années 1970 a amené la communauté internationale à percevoir la télédétection comme une source d'informations renouvelables permettant d'évaluer régulièrement les atteintes à la forêt. Ainsi, au cours de la conférence des Nations unies tenue à Stockholm en 1972, la télédétection a été suggérée comme outil de « suivi global direct ». Dès lors, plusieurs projets de cartographie ont été initiés sous l'impulsion d'organismes de coopération et d'appui au développement (FAO, PNUE, U.E., etc.).

Privilégiant une approche régionale, ces projets ont eu largement recours à l'imagerie Landsat, puis Spot, pour des évaluations à une échelle de l'ordre du 1/200 000 (Blasco, 1990). Depuis une dizaine d'années, l'utilisation d'images fournies par les capteurs à large champ, et notamment le capteur AVHRR de NOAA, permet d'établir des cartes à petite échelle (à partir du 1/500 000) montrant, à une date donnée, l'état global du couvert végétal dans une région ou un continent (Laporte et *al*., 1998 et 1995 ; TREES, 1998 ; Lambin et Ehrlich, 1997 ; Malingreau et *al*. 1989). A ce niveau d'observation, ce sont surtout les zones de déforestation de grande ampleur (« *deforestation hot spot* », « *active deforestation area* ») qui sont cartographiées, parfois sans précision sur la nature du couvert qui se substitue à la forêt. De la sorte, les caractéristiques de la déforestation tropicale, ainsi que les mécanismes qui la sous-tendent et expliquent son évolution spatio-temporelle, restent inexplorés. Pourtant, depuis plus d'un demi-siècle, la télédétection offre des données qui permettent d'analyser les ressources de la Terre et les modifications qui affectent l'environnement.

Dans cette optique, la préoccupation qui est à la base de cette thèse est à la fois thématique et méthodologique. Sur le plan thématique, il s'agit de contribuer à une meilleure compréhension du phénomène de déforestation en milieu tropical, en évaluant l'impact des pratiques agricoles sur l'évolution des surfaces forestières en Amazonie. Cette recherche, initialement consacrée exclusivement aux abattis de la

Guyane française, a été ensuite élargie aux fronts pionniers du Brésil voisin[3]. Cet élargissement permet d'aborder les différentiations spatiales des formes de déforestation dans un même ensemble géographique. Sur le plan méthodologique, l'objectif du travail est d'élaborer une stratégie de surveillance basée sur l'utilisation de la télédétection considérée comme moyen d'observation continue de l'environnement.

Ces deux objectifs nous conduisent à situer les outils d'observation de la Terre au cœur de cette recherche. Cependant, l'objet d'étude n'est pas la télédétection, car le problème à résoudre n'est pas de développer de nouveaux algorithmes ou de nouvelles techniques d'enregistrement et d'interprétation du signal. Le but de ce travail est de chercher dans la gamme des données aérospatiales disponibles, celles dont l'interprétation et le traitement permettent d'évaluer et de surveiller l'évolution du couvert forestier en Amazonie. Une telle étude implique néanmoins une analyse critique des potentialités et limites des systèmes actuels d'observation par satellites.

Bien que le travail porte sur l'Amazonie, le souci d'application des acquis méthodologiques aux autres régions tropicales humides est au centre de notre recherche. Il sous-tend aussi la stratégie de suivi proposée, car les problèmes inhérents aux pressions croissantes sur les ressources forestières et la transformation rapide des milieux, sont communs à l'ensemble de la zone tropicale.

A la question de savoir si on peut suivre par télédétection les défrichements agricoles en forêt amazonienne, nous faisons l'hypothèse du oui, car ils laissent des traces détectables par les satellites d'observation de la Terre. Toutefois, avant l'identification et la caractérisation de ces empreintes spatiales sur les images, une description fine au sol s'avère indispensable. Il ne s'agit pas de décrire le terrain par

[3] Le projet qui a reçu un financement du CNES via le Centre Spatial Guyanais, portait sur « l'approche spatiale des abattis en Guyane française ». C'est chemin faisant que nous avons pris en compte les fronts pionniers du Nord du Brésil, suite à l'analyse préliminaire d'une série d'images NOAA AVHRR acquises dans notre laboratoire d'accueil (le LRT). Cette réorientation est intervenue trop tardivement pour nous laisser le temps de « faire du terrain » au Brésil comme nous l'avons fait en Guyane française.

respect de la démarche classique du géographe, mais pour mieux analyser les images, suivre et expliquer l'évolution des défrichements, procéder à la cartographie de l'occupation du sol, etc. De la sorte, nous intégrons la télédétection dans le raisonnement et la démarche géographiques. Connaissant bien les objets d'étude à partir d'observations de terrain, les configurations spatiales et spectrales sont ensuite relevées au travers des procédures d'analyse d'images.

Ces procédures comprennent la photo-interprétation des compositions colorées et les classifications numériques. La mise en correspondance des relevés de terrain avec les signatures spectrales et spatiales permet de formuler une méthodologie de suivi par télédétection. Pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de ce suivi, nous avons utilisé les images d'archives pour décrire l'évolution de l'occupation du sol. Les données socio-économiques issues d'enquêtes agricoles et de recensements démographiques renseignent sur les facteurs qui sont à la base des changements notés, ce qui permet de mettre en évidence les dynamiques de déforestation et d'en tenir compte dans la chronologie d'acquisition d'images et la chaîne de traitements préconisées à la fin de l'étude.

La différence d'emprise spatiale des défrichements nous conduit d'emblée à retenir trois niveaux d'analyse :

1. Le niveau régional, au sens de région amazonienne, pour avoir une vision d'ensemble de l'environnement et détecter les défrichements qui sont perceptibles à ce niveau d'observation : les fronts pionniers, qui sont des défrichements de grande ampleur. Les images NOAA AVHRR et Spot 4 VEGETATION servent de support à ce niveau d'analyse.

2. Le niveau sous régional, d'une part pour caractériser les fronts pionniers, d'autre part pour identifier les défrichements de faible emprise spatiale (abattis). Les images Landsat TM et Spot XS sont utilisées à cet échelon de l'analyse.

3. Enfin, le niveau local, pour caractériser les abattis. Pour ce faire, nous avons utilisé les photographies aériennes.

Le choix de ces trois niveaux d'analyse est guidé par la recherche de correspondances entre les caractéristiques spatiales et spectrales des capteurs et les dimensions au sol des parcelles défrichées. En passant d'un niveau d'analyse à un autre, nous mettons en évidence les apports et/ou les pertes respectifs dans l'interprétation thématique et la quantification/cartographie des surfaces déforestées.

Au regard de ces considérations, nous avons adopté une approche multi-scalaire, car la variabilité des échelles spatiales auxquelles la déforestation se déroule en Amazonie peut être mise en rapport avec les diverses résolutions spatiales proposées par les capteurs qui enregistrent les images. Une telle approche implique une analyse multi-capteur, ce qui permet de relever les spécificités des différents systèmes d'acquisition, ainsi que les complémentarités qui apparaissent entre eux. Cette remarque souligne la nécessité d'une utilisation conjointe d'images de nature variée pour le suivi de l'environnement en milieu tropical où la forte nébulosité limite fréquemment la qualité de certaines acquisitions (Spot, Landsat, NOAA, etc.).

Au total, la démarche méthodologique mise en œuvre pour réaliser cette recherche se décline en trois étapes principales (fig.1, p. 20).

1. La première consiste à caractériser les défrichements à partir de critères liés à l'observation depuis l'espace : critères spatiaux, spectraux et temporels essentiellement. L'analyse d'images s'appuie sur la connaissance du contexte et des modalités de déforestation et d'évolution physiologique des parcelles défrichées.

2. L'étape suivante est axée sur la mise en évidence des dynamiques d'occupation agricole du sol. Pour ce faire, nous appliquons aux images les

techniques de détection des changements. Nous recherchons les facteurs explicatifs de ces changements en exploitant les données socio-économiques.

3. Enfin, la dernière étape est consacrée à la formulation d'un « vade-mecum » pour la surveillance[4] des forêts et la gestion des problèmes d'environnement et d'aménagement en milieu tropical humide. Cette étape tire parti des résultats obtenus dans les phases précédentes, puisqu'elle constitue l'aboutissement de la recherche.

L'organisation d'ensemble de ce mémoire obéit à la logique qui a présidé à la conception et à la conduite de l'étude telle que nous venons de l'exposer. Nous avions envisagé une structuration en « parties », mais celle-ci s'est avérée peu cohérente et déséquilibrée au regard du double objectif thématique et méthodologique qui sous-tend la recherche et guide l'enchaînement de la restitution des résultats. Aussi, par souci de clarté et de fluidité dans la présentation du travail, nous avons finalement opté pour une articulation simple en chapitres, sans les regrouper en « parties ».

Par ailleurs, nous avons quelque peu dérogé au rituel qui pousse à commencer les mémoires en présentant la zone d'étude. Ce choix se justifie par la volonté de situer cette recherche dans une perspective mondiale, car la déforestation interpelle l'ensemble de la communauté internationale. Cependant, par souci de coller aux réalités pour les besoins d'application en Amazonie, les spécificités géographiques et le contexte socio-économique de cette région sont rappelés chaque fois qu'ils s'avèrent indispensables à la compréhension des choix méthodologiques et des développements thématiques. Le mémoire est structuré en 7 chapitres.

Le chapitre premier aborde les enjeux autour des forêts tropicales aujourd'hui au cœur des préoccupations environnementales. Ce chapitre passe en revue les

[4] L'expression surveillance est utilisée dans ce mémoire au sens de « monitoring » et non de contrôle de type policier.

principales évaluations publiées à ce jour, et en particulier celles de la FAO. A travers cette revue, nous tentons de faire le point sur l'étendue actuelle des forêts et l'évolution récente des superficies déforestées.

Le deuxième chapitre traite de la déforestation tropicale comme phénomène géographique complexe. Il recentre le débat en proposant une relecture de la construction et de la pérennisation du discours tendant à considérer la déforestation en milieu tropical comme le résultat de l'action des populations locales sur les forêts denses environnantes.

Le troisième chapitre présente l'état des lieux des défrichements agricoles en Amazonie. En prélude à la caractérisation par télédétection, il décrit le contexte géographique et démographique en expliquant la signification socio-politique et écologique des abattis et des fronts pionniers. Il aborde aussi les problèmes d'aménagement du territoire et de gestion du foncier inhérents à la déforestation.

Le chapitre quatre expose les méthodes de caractérisation et de suivi des défrichements agricoles par télédétection. Il justifie le choix des capteurs et des niveaux d'analyse, et déroule les principales étapes de la caractérisation des abattis et des fronts pionniers par l'analyse des configurations spatiales et spectrales. En outre, ce chapitre fait le point sur les méthodes et techniques de détection des changements et indique celles à utiliser pour mettre en évidence l'évolution des défrichements agricoles.

Le cinquième chapitre décrit la configuration spatiale et spectrale des défrichements aux trois niveaux d'analyse retenus : le régional, le sous-régional et le local. Chaque niveau correspond à une étape de la caractérisation. Ainsi, les empreintes des fronts pionniers et des abattis sont tour à tour détectées, identifiées et analysées.

Le sixième chapitre examine les dynamiques agraires et pastorales mises en évidence par les méthodes de détection des changements d'occupation du sol appliquées aux

images multidates. De la sorte, il évalue l'impact des abattis et des fronts pionniers dans l'évolution de la déforestation en Amazonie.

Le dernier chapitre propose une stratégie de surveillance du couvert forestier amazonien par télédétection. Cette stratégie est basée sur la connaissance de l'environnement géographique régional, et sur l'ensemble des résultats thématiques et méthodologiques obtenus tout au long de la recherche. Il propose une veille aérospatiale et précise les niveaux spatiaux de suivi, ainsi que les indicateurs complémentaires non dérivés des données de télédétection.

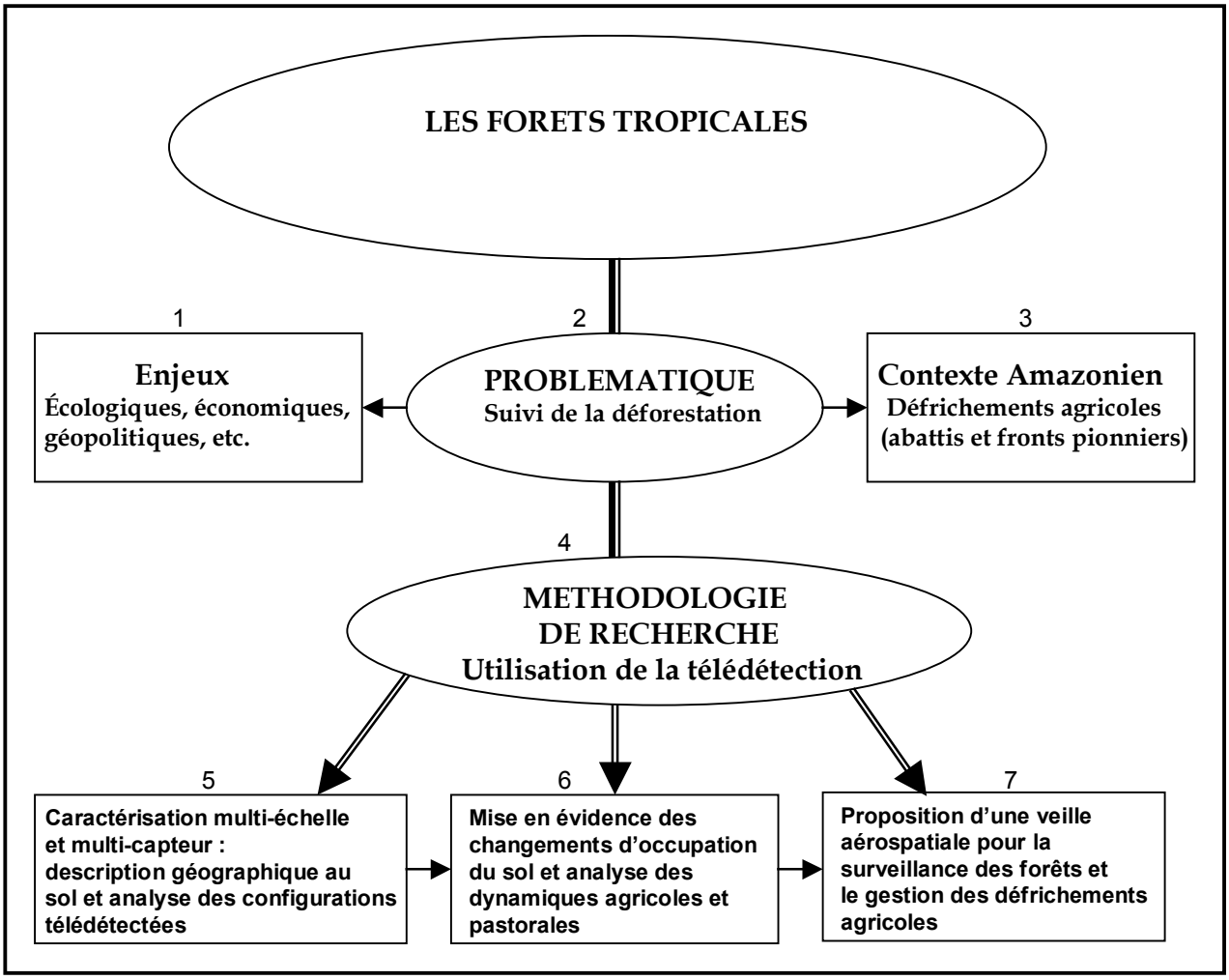


Figure 1. Organigramme synthétique de l'étude
(N.B. Les chiffres renvoient aux chapitres du mémoire)

CHAPITRE 1

LES FORETS TROPICALES
ENJEUX ET EVALUATIONS DES SUPERFICIES

Les forêts tropicales font l'objet d'une attention croissante de la part de la communauté internationale. Elles sont dites vitales pour la vie sur la terre. Dès lors, on peut s'interroger sur leurs fonctions écologiques, le rôle qu'elles jouent dans la régulation des cycles bioclimatiques et géochimiques, leur étendue…

L'objectif de ce chapitre est de tenter d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations à partir de la littérature, afin d'approfondir le questionnement et la réflexion amorcés dans l'introduction générale.

Ainsi, après avoir montré la place des forêts tropicales dans les préoccupations environnementales contemporaines, nous aborderons la quantification de l'étendue des couverts forestiers en particulier au travers des évaluations de la FAO. Ensuite, nous ferons le point sur l'utilisation de la télédétection à des fins d'amélioration des cartographies et pour la production des statistiques sur les superficies de forêts des régions tropicales.

I. Forêts tropicales et préoccupations environnementales contemporaines

Les forêts tropicales sont au centre des débats menés dans les forums internationaux consacrés aux problèmes d'environnement. Elles font l'objet de négociations géopolitiques internationales, en raison de leurs fonctions écologiques, mais aussi de leur importance économique. On estime qu'elles jouent un rôle qui sera encore plus essentiel dans la perspective des changements globaux dont l'imminence est annoncée.

I.1. Fonctions écologiques et importance économique des forêts tropicales

Les scientifiques, et plus particulièrement les biologistes et les écologues, s'accordent pour souligner le rôle des forêts dans le fonctionnement de la biosphère terrestre. D'après Puig (2001a), les forêts tropicales abritent la plus grande partie de la diversité spécifique connue et inconnue sur la terre : plus de 50 % d'espèces animales et végétales (soit 3 à 8 millions d'espèces), dont 80 % d'insectes, 84 % de reptiles, 91 % d'amphibiens et 90 % de primates. Le nombre d'espèces d'arbres par hectare est évalué entre 200 et 300 en forêt tropicale humide, contre une quinzaine en forêt tempérée (Puig, 2001b). En raison de cette grande variété d'espèces végétales et animales qu'elles regorgent, les forêts tropicales sont au cœur des débats sur la biodiversité. Elles sont considérées comme des « réserves biologiques mondiales » inscrites au « patrimoine génétique de l'humanité ».

Au plan climatique et hydrologique, on estime qu'elles sont fondamentales dans la régulation des mécanismes qui régissent le climat et les régimes d'eau (Fritsch, 1992 ; Sarrailh 1990). Leur contribution à la protection des couvertures pédologiques a été largement décrite (Pomel et Salomon, 1998). De la sorte, la déforestation tropicale est considérée comme synonyme d'érosion des sols (Pasquis, 1999 ; Levêque, 1994).

Au plan économique, les forêts tropicales constituent une importante source de production et de commercialisation du bois et des produits dérivés : panneaux, charbon de bois, sciages, pâte à papier, etc. Près de 90 % de la production mondiale du bois de chauffage et du charbon de bois proviennent des régions tropicales qui fournissent aussi 22 % de pâte à papier et 26 % de sciages utilisés dans le monde (tabl. 1). Toutefois, la principale ressource de ces forêts est le bois d'œuvre. Son exploitation et sa commercialisation rapportent des devises considérables aux budgets des pays d'Afrique et d'Asie (Karsenty, 1999).

Tableau 1. Importance économique des produits forestiers tropicaux
(chiffres de 1995)

Produits forestiers	Quantité	Pourcentage de production mondiale
Sciages (millions m^3)	111	26
Panneaux dérivés du bois (millions m^3)	45	31
Pâte à papier (millions de tonnes)	41	22
Papier et carton (millions de tonnes)	61	22
Bois de chauffage et charbon de bois (millions de m^3)	1638	89

Sources : FAO : http://www.fao.org (cité par Roper et Roberts, 1999)

Ainsi qu'on le voit, les forêts tropicales remplissent des fonctions écologiques et économiques qui leur confèrent un intérêt considérable. De la sorte, elles suscitent énormément d'enjeux lors des négociations menées dans les forums internationaux. Pouvait-il en être autrement surtout si on situe ces forêts dans la perspective des changements globaux qui focalisent l'attention de la communauté scientifique et politique mondiale depuis plus d'une dizaine d'années ?

I.2. Forêts tropicales et changements globaux

Face au constat de l'augmentation continue des températures moyennes à la surface de la terre, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ont constitué en 1988 un groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change). Ce groupe indique dans un rapport récent que la température moyenne globale de la Terre s'est accrue de 0,3 à 0,6° C durant le 20ème siècle (IPCC, 2000, cité par la FAO, 2001a). Les prévisions font état d'une hausse de 1,5 à 6° C au cours du siècle actuel (Puig, 2001b). D'après les experts, cette situation entraîne le réchauffement de la planète et est susceptible de provoquer des modifications importantes dans le fonctionnement du système climatique et écologique mondial ; c'est le « *global change* ».

L'émission croissante d'aérosols et de gaz à effet de serre, et leur concentration massive dans l'atmosphère, sont considérées comme les principales causes de ce changement global. Parmi les gaz mis en cause, les plus importants sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le dioxyde nitreux (N_2O). On estime que le CO_2 est responsable d'environ 65 % de l'effet de serre (FAO, 2001a). Mais on dispose de peu de connaissances sur la contribution des facteurs naturels, notamment l'activité solaire, dans le réchauffement actuel du climat. Toutefois, il est admis que les activités humaines entraînent une production considérable de gaz carbonique et accroissent les quantités de CO_2 libérées dans l'atmosphère.

Les forêts tropicales constituent un important réservoir de CO_2 ; elles concentrent environ 20 % du stock de carbone terrestre. Or, par le déboisement, elles sont devenues la principale source d'émission de CO_2 émanant des écosystèmes terrestres (Houghton, 1999 et 1996). La quantité de CO_2 émise annuellement dans l'atmosphère suite à la déforestation tropicale est évaluée par le groupe intergouvernemental d'experts sur les changements climatiques entre 0,4 et 2,5 Gt, soit un tiers des rejets dus aux combustibles fossiles (Mas, 1998).

Les craintes suscitées par l'évolution du climat de la Terre ont amené la communauté internationale à réfléchir sur les mesures à prendre en vue de limiter les émissions de gaz carbonique. Le protocole de Kyoto, adopté en 1997, s'inscrit dans cette démarche. Il a fixé un certain nombre d'objectifs concernant notamment les inventaires de puits de CO_2 et les permis d'émission de gaz à effet de serre par pays. L'importance du rôle des forêts par rapport aux changements globaux fait en sorte que la déforestation soit de plus en plus perçue comme le spectre d'un désastre écologique planétaire (Levêque, 1994). Les forums environnementaux se multiplient et recommandent sans cesse l'évaluation de l'étendue des forêts et le suivi des modifications qu'elles subissent. C'est une tâche à laquelle s'attèlent de nombreux experts et organismes internationaux. Comment s'y prennent-ils ? Quels résultats obtiennent-ils ? Quel bilan peut-on dresser au regard des statistiques publiées ?

II. Evaluations classiques des étendues de forêts et de la déforestation

Les statistiques sur l'étendue des forêts et les estimations des superficies déforestées au niveau mondial proviennent essentiellement de deux sources : les inventaires nationaux regroupés par la FAO, et les calculs effectués par les experts indépendants (sans étiquette institutionnelle). Ces deux catégories d'évaluations sont dites classiques par opposition aux évaluations par télédétection[1].

II.1. Les évaluations de la FAO

Trois ans après sa création en 1945, cet organisme spécialisé des Nations unies procède à la première estimation de l'étendue des forêts du monde en s'appuyant sur les données d'un questionnaire auquel 126 pays ont répondu. Il évalue alors la surface des forêts du monde à 4 milliards d'hectares. Entre 1953 et 1963, il réalise une série d'évaluations, toujours à partir des réponses fournies aux questionnaires soumis aux pays membres. Sur cette base, la surface forestière mondiale est estimée à 3,8 milliards d'hectares en 1963. Au cours des années 1970, la FAO adopte une approche par continent, mais celle-ci se révèle inappropriée pour l'extrapolation des résultats au niveau mondial.

L'évaluation de 1980 marque une innovation majeure. Pour la première fois, on indique les critères et les paramètres à prendre en compte dans la définition de la forêt : surface forestière élémentaire de mesure (10 ha), hauteur minimale des arbres (7 m), taux de recouvrement du sol par les ligneux (10 % pour les régions tropicales et 20 % pour les régions tempérées et boréales). De plus, les experts nationaux et internationaux sont consultés pour ajuster les statistiques obtenues. Les résultats publiés en 1982 font état d'une couverture forestière globale de 4,05 milliards

[1] Les évaluations par inventaires forestiers découlent en grande partie de comptages effectués au sol. Cependant, les photographies aériennes sont souvent utilisées au début des opérations pour échantillonner les massifs forestiers et déterminer les unités spatiales dans lesquelles les dénombrements vont être effectués. Quant aux évaluations par télédétection, elles découlent de traitements et analyses d'images satellites. La section III est consacrée à cette catégorie d'évaluations. Nous l'avons traitée dans une section à part en raison du caractère récent de cette approche, mais aussi en raison de la place et l'importance de la télédétection dans cette recherche.

d'hectares, dont 2,1 milliards d'hectares de forêts tropicales. En 1988, un rapport intermédiaire utilisant les critères de l'évaluation de 1980 aborde pour la première fois la quantification de l'évolution des superficies de forêts. Il relève un changement de couverture forestière portant sur 11,4 millions d'hectares par an dans les régions tropicales. Désormais, on peut estimer les superficies en tenant compte des défrichements entre deux d'évaluations.

L'évaluation de 1990, publiée en 1995, concerne d'une part les forêts tempérées et boréales, et d'autre part les forêts tropicales. Pour réduire l'incohérence des statistiques fournies par les pays du Sud, un modèle mathématique fondé sur les densités de population est élaboré pour calculer les superficies déforestées dans les régions tropicales. Ce modèle permet de quantifier pour ces régions les changements survenus entre 1980 et 1990. La couverture forestière mondiale est alors estimée à 3,4 milliards d'hectares, et la déforestation tropicale annuelle est évaluée à 15,4 millions d'hectares pour la période 1980 – 1990. La réactualisation des statistiques pour 1995 indique une déforestation tropicale de 13,7 millions d'hectares par an entre 1990 et 1995.

Le plus récent bilan de la FAO sur l'étendue des forêts du monde a été publié en 2001. Pour le réaliser, une définition commune a été adoptée pour l'ensemble des forêts de la planète. Elle considère comme forêt, toute portion de terre de surface supérieure à 0,5 ha, disposant d'une densité d'arbres de hauteur au moins égale à 5 m, avec un taux de recouvrement du sol supérieur ou égal à 10 % (FAO, 2001a). Cette définition prend en compte aussi bien les forêts dites naturelles que les plantations forestières (chênes-liège ou hévéas par exemple). Par contre, elle exclut les peuplements de production agricole comme les plantations d'arbres fruitiers.

Malgré les efforts d'harmonisation des données provenant de divers pays, les évaluations de la FAO présentent quelques incohérences. Elles résultent de l'hétérogénéité des inventaires forestiers nationaux, sources de base des statistiques examinées. Les années de référence, les méthodes de collecte et de calcul, la qualité et

la fiabilité des données, peuvent varier énormément d'un pays à l'autre (Pomel et Salomon, 1998). Par ailleurs, les définitions, les méthodes d'analyse, de traitement et d'extrapolation, ne sont pas constantes, aussi bien d'une évaluation à l'autre que d'une zone écologique à une autre.

Nous allons illustrer ces propos en nous appuyant sur l'évaluation de 1990 publiée en 1995 et faisant état d'une superficie forestière mondiale de 3,4 milliards d'hectares. Pour cette évaluation, la FAO avait utilisé des critères différents, en particulier le seuil de 10 % de densité de recouvrement arboré au sol appliqué dans les régions tropicales, et 20 % dans les régions tempérées et boréales. Des calculs récents montrent que si des critères identiques avaient été appliqués partout, et notamment le seuil de 10 %, on aurait obtenu une surface forestière mondiale de 3,9 milliards d'hectares, soit une augmentation de 520 millions d'ha par rapport au chiffre publié en 1995. Le tableau 2 montre que la différence globale entre les deux séries de statistiques est de 15 %. Ce tableau a été établi par compilation de plusieurs séries statistiques publiées en 2001 par la FAO. Afin de donner un aperçu le plus cohérent possible, nous avons effectué des ajustements pour faciliter les comparaisons. Cet exemple montre que les résultats d'une évaluation sont liés aux critères pris en compte pour effectuer les mesures. Par conséquent, il convient de considérer les statistiques avec beaucoup de prudence, et de les utiliser en toute connaissance des procédures mises en œuvre pour les obtenir.

Tableau 2. Revue de l'évaluation des superficies forestières de l'année 1990 (milliers d'ha)

Régions	**1990 (A)**	**1990 (B)**	**B-A**	**%**
Afrique	545 089	702 475	157 386	28,9
Asie	489 672	530 595	40 923	8,4
Océanie	88 254	201 176	112 922	128
Europe	895 155	1 051 321	156 166	17,4
Amérique du N. et du C.	531 276	555 002	23 726	4,5
Amérique du Sud	892 929	922 731	29 802	3,3
Total	**3 442 375**	**3 963 300**	**520 925**	**15,1**

Source, FAO (2001a,b,c)

A : statistiques initiales obtenues sur la base des critères différents suivant les zones écologiques
B : statistiques revues suite à l'application de critères identiques pour définir l'unité élémentaire de mesure.

En synthétisant les évaluations de la FAO, on relève une évolution des méthodes d'estimation visant à améliorer la précision des résultats. Cette amélioration peut être découpée en 4 grandes périodes (tabl. 3) :

1. La période 1948 – 1970 : elle est caractérisée par une sorte de balbutiement et de tâtonnement dans la mise en place et la conduite des évaluations. C'est pour nous « la période sombre », car les critères d'évaluation ne sont pas clairement définis et les résultats qui en découlent sont peu explicites.

2. La décennie 1980 : elle est marquée par une participation plus accrue des pays membres de la FAO. Outre la définition des critères à appliquer dans les régions tropicales d'une part, et dans les régions tempérées et boréales d'autre part, la FAO consulte les experts et essaie d'utiliser la télédétection en faisant analyser des tirages papiers d'images Landsat au 1/1000 000. Les résultats sont présentés par zone écologique, et l'évolution de la déforestation tropicale est évaluée.

3. La décennie 1990 : au cours de celle-ci, on réutilise les méthodes de la décennie précédente, avec toutefois le recours à un modèle mathématique pour améliorer les statistiques issues d'inventaires réalisés dans les pays du Sud. Par ailleurs, la télédétection passe du stade de test au stade d'application. L'évolution de la déforestation dans les pays tropicaux est alors estimée à partir de calculs effectués sur un échantillon d'images Landsat.

4. La période actuelle : elle tire parti des acquis méthodologiques des phases précédentes et est marquée par une harmonisation des critères d'évaluation qui sont appliqués uniformément dans les régions tropicales et dans les régions tempérées et boréales. La télédétection est de plus en plus mise à contribution dans les procédures d'évaluation.

Tableau 3. 50 ans d'évaluation des superficies forestières par la FAO

	Années	Méthodes d'évaluation des superficies	Principaux résultats
	1948	Compilation d'inventaires réalisés dans 66% de pays membres	Monde : 4,0 milliards d'ha de forêts
1	1953 1958 1963	Compilation d'inventaires réalisés dans 73% de pays membres Compilation d'inventaires réalisés dans 88% de pays membres Compilation d'inventaires réalisés dans 68% de pays membres	Monde : 3,8 milliards d'ha de forêts
	Décennie 1970	Inventaires par continents (Europe, Amérique latine, Asie, Afrique)	Pas d'estimations globales des surfaces
2	1980	Inventaires fournis par 97% des pays du Sud et 76% des pays du Nord. Définition des critères : surface minimale fixée à 10 ha, recouvrement de 10% dans les pays tropicaux et 20% ailleurs ; taille de l'arbre fixé à 7 m. Consultation d'experts nationaux et internationaux. Test de la télédétection : interprétations visuelles de tirages au 1 : 1000 000	Monde : 4,05 milliards d'ha de forêts Tropiques : 2,1 milliards d'ha
	1988	Réactualisation de l'inventaire de 1980	Monde : 3,6 milliards d'ha de forêts Déforestation tropicale 1981-1985 : 11,4 millions d'ha/an
3	1990	Inventaires fournis par la quasi totalité des pays membres. Utilisation d'un modèle mathématique fondé sur les densités démographiques pour générer les statistiques forestières des pays du Sud. Analyse multidate d'un échantillon d'images Landsat (au 1 : 250 000) pour évaluer les changements (1980-1990) dans les régions tropicales. Consultation d'experts nationaux et internationaux	Monde : 3,4 milliards d'ha Déforestation tropicale 1980-1990 : 15,4 millions d'ha/an Déforestation mondiale 1980-1990 : 9,9 millions d'ha/an
	1995	Réactualisation de l'évaluation de 1990	Monde : 3,4 milliards d'ha de forêts Déforestation tropicale 1990-1995 : 13,7 millions d'ha/an Déforestation mondiale 1990-1995 : 11,3 millions d'ha/an
4	2000	Inventaires fournis par la quasi totalité des pays membres. Application de critères communs à l'ensemble des régions : surface minimale fixée à 0,5 ha, 10% de recouvrement du sol, arbres d'au moins 5 m de hauteur, exclusion des plantations d'arbres fruitiers et d'agroforêts, prise en compte des peuplements non naturels. Analyse multidate d'un échantillon d'images satellites pour évaluer les changements (1990-2000) dans les régions tropicales. Cartographie des zones écologiques à partir d'images NOAA. Consultation d'experts nationaux et internationaux.	Monde : 3,8 milliards d'ha Tropiques : 2,1milliards d'ha Déforestation tropicale 1990-2000 : 14,2 millions d'ha/an Déforestation mondiale 1990-2000 : 14,6 millions d'ha/an

M. Tsayem, 2002 (compilation des publications de la FAO)

Cette synthèse montre que la FAO dispose d'une longue expérience dans l'évaluation de l'étendue des forêts et de la déforestation dans le monde. En améliorant ses procédures d'évaluation, cet organisme essaie autant que possible de garder la cohérence et l'homogénéité entre les différentes évaluations. Si ses résultats font autorité, ils ne sont cependant pas les seuls, car d'autres évaluations classiques existent.

II.2. Les autres évaluations classiques

Outre les statistiques publiées par la FAO, la littérature sur les forêts tropicales recèle une grande quantité de chiffres issus de calculs et de travaux d'experts. Il s'agit très souvent d'extrapolations réalisées à partir d'inventaires effectués sur un échantillon de pays (Grainger, 1993).

Le rapport de Myers publié en 1980 illustre ce procédé. A partir des données collectées dans 13 pays, il estime la superficie des forêts tropicales à 972 millions d'hectares dans les années 1970, et indique pour la même période un taux annuel de déforestation oscillant entre 0,7 et 2 % dans les pays du Sud. Son rapport devient une référence, bien qu'il précise qu'il ne s'agit que d'une approximation de la réalité. En 1989, il publie un autre rapport basé sur les statistiques collectées dans 34 pays. Dans ce rapport, il fait état d'une superficie forestière de 800 millions d'hectares dans les régions tropicales pour la décennie 1980, avec un taux annuel de déforestation de 1,4%, soit une perte moyenne de 14,2 millions d'hectares par an.

Un recensement non exhaustif des estimations publiées met en évidence une grande divergence dans les chiffres. En ce qui concerne la couverture forestière mondiale par exemple, les évaluations effectuées entre 1961 et 1979 indiquent une superficie globale qui varie du simple au triple, soit de 2 à 6 milliards d'hectares selon les experts (tabl. 4). On ne saurait imputer cette variation à une éventuelle évolution des superficies de forêts, puisqu'on note une grande différence même entre les évaluations publiées en l'espace de quelques mois seulement (celles des années 1971, 1974 et 1978 ; tabl. 4).

Les calculs d'experts sur l'évaluation de la déforestation tropicale appellent un commentaire similaire. Pour la décennie 1980 par exemple, les forêts tropicales auraient perdu annuellement 6,1 millions d'hectares d'après l'estimation de Grainger, et 14,2 millions d'hectares si on considère celle de Myers (tabl. 5).

Tableau 4. Evaluations des superficies forestières mondiales entre 1961 et 1979

Années de publication	Superficie forestière (milliards d'ha)	Auteurs
1961	2,47	Weck et Wiebecke
1971	3,59	Bruning
1971	5,00	Whittaker et Woodwell
1971	5,29	Bazilevich, Rodin et rozov
1972	5,00	Lieth
1973	4,85	Whittaker et Likens
1974	2,39	Windhorst
1974	4,03	Person
1974	4,15	Bruning
1975	2,65	Eckholm
1975	4,80	Olson
1975	5,00	Lieth et Whittaker
1978	2,56	Ross-Sheriff
1978	3,71	Openshaw
1978	6,05	Eyre
1979	3,79	Steele

Source : Allen et Barnes (1985), cités par Arnould, 1999

Tableau 5. Evaluations de l'étendue des forêts et de la déforestation tropicales entre 1970 et 1980

Période	Etendue forestière (millions d'ha)	Déforestation (millions d'ha par an)	Source
Décennie 1970	935	11 à 15	Sommer (1976)
Décennie 1970	972	7,5 à 20	Myers (1980)
Décennie 1980	1081	6,1	Grainger (1983)
Décennie 1980	800	14,2	Myers (1989)

Sources : Brown et Pearce, 1994 ; Grainger, 1993

La lisibilité de l'étendue des forêts et de la déforestation paraît difficile au regard de la multiplicité et de l'hétérogénéité des statistiques. Si la FAO fait l'effort d'éprouver et d'expliciter ses méthodes d'évaluation comme on l'a vu dans les pages

précédentes, il n'en va pas de même pour de nombreux experts. C'est sans doute ce qui explique que les données de la FAO soient de plus en plus considérées comme les seules vrais références. Nous allons les utiliser pour donner un aperçu général de l'évolution récente des superficies de forêts dans le monde, en mettant l'accent sur les forêts des régions tropicales.

II.3. Aperçu général de l'étendue des forêts et leur évolution récente

D'après la dernière évaluation mondiale basée sur les statistiques nationales de la quasi totalité des pays membres de la FAO, la terre est recouverte de forêts sur une superficie totale de 3,8 milliards d'hectares en l'an 2000[2]. La figure 2 donne une vue d'ensemble de la répartition de ces forêts. Les forêts tropicales et subtropicales représentent respectivement 47 % et 9 % du couvert forestier mondial, et se trouvent principalement en Amérique du Sud et en Afrique (tabl. 6). Elles constituent donc 56 % de l'étendue forestière de la planète, soit environ 2 milliards d'hectares. Quant aux forêts tempérées et boréales, elles correspondent respectivement à 11 % et 33 % du couvert forestier de la terre.

Tableau 6. Répartition des types de forêt par continent

	Afrique	Asie	Amérique du Nord et du Centre	Amérique du Sud	Europe	Océanie	Monde
Forêts tropicales	28	18	5	47	/	1	47
Forêts subtropicales	2	42	37	5	7	7	9
Forêts tempérées	/	17	39	2	39	4	11
Forêts boréales	/	2	34	/	65	/	33

Source : FAO (2001a,b)

La superficie des forêts s'accroît en Europe, suite à l'extension des reboisements et à la reprise forestière consécutive à la déprise agricole et rurale. Parallèlement, elle diminue sous les tropiques (tabl. 7 et 8). Ainsi, on a noté une perte annuelle de 15,4 millions d'hectares de forêt tropicale entre 1980 et 1990, soit un rythme de

[2] 3,8 milliards d'ha, c'est plus de deux fois la surface de la Russie.

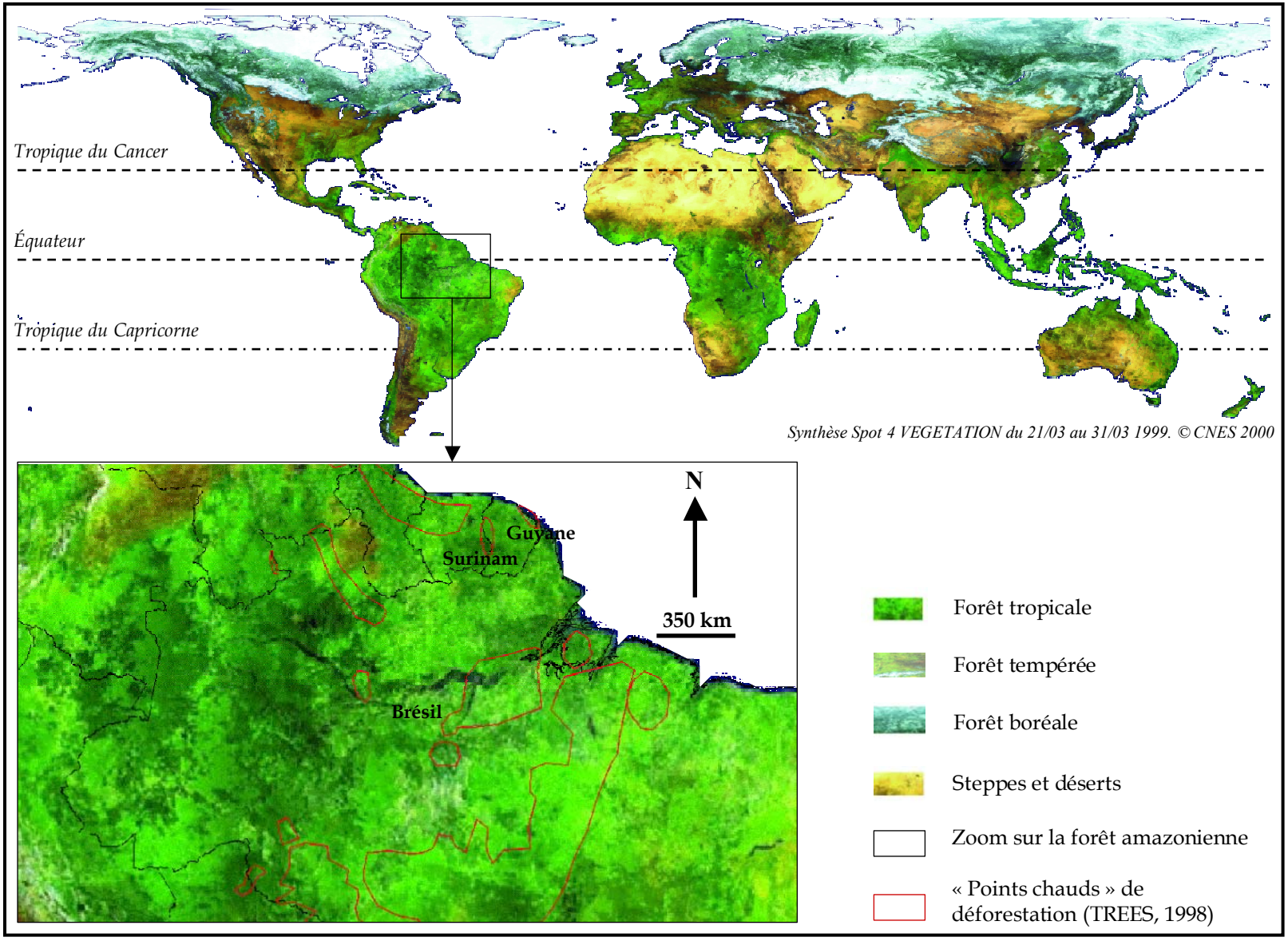


Figure 2. Répartition des forêts dans le monde

déforestation de 0,8 % par an[3]. Un pourcentage similaire est observé pour la décennie 1990-2000, avec 14,2 millions d'ha déforestés chaque année. Ce chiffre contraste avec celui des régions non tropicales où le déboisement n'a concerné que 0,4 millions d'hectares par an de 1990 à 2000.

Entre 1980 et 1990, les plus grandes pertes annuelles ont été enregistrées en Amérique du Sud : 6,1 millions d'ha, contre 4 millions d'ha en Afrique (tabl. 8). Cette tendance ne s'est pas confirmée au cours de la décennie 1990-2000. De la sorte, c'est le continent africain qui a été le plus touché par la déforestation, avec un taux annuel de 0,8 %, soit une perte de 5,2 millions d'hectares chaque année, contre 3,7 millions d'hectares en Amérique du Sud (tabl. 8). Par ailleurs, puisque la FAO prend en compte les plantations forestières dans ses évaluations, la pratique de la sylviculture en Asie a eu pour effet de compenser le recul des superficies forestières. Le taux annuel de déforestation y est passé de 0,3 % entre 1980 et 1990 à 0,1 % entre 1990 et 2000. Toutefois, ce chiffre global cache de profondes disparités régionales, car en Asie du Sud-Est par exemple, le rythme de déforestation est demeuré supérieur à 1% par an durant la même période (tabl. 7 et 8).

Ainsi que le suggèrent la quantité et la variété des chiffres que nous avons cités, les évaluations classiques apparaissent comme des opérations qui nécessitent des moyens techniques et matériels considérables. De l'inventaire forestier jusqu'au traitement statistique et à la ventilation des résultats par pays, continents et zones géographiques, la procédure est longue, coûteuse et suppose de nombreux ajustements et extrapolations pour une présentation harmonieuse des résultats. Avec l'avènement de l'imagerie satellite au début des années 1970, la télédétection spatiale a été perçue comme une source de données pouvant faciliter l'évaluation des superficies forestières et des surfaces déforestées. Dans cette optique, plusieurs initiatives d'utilisation d'images satellites ont été entreprises.

[3] 14,2 millions d'ha déforestés par an, cela équivaut au territoire de la Guyane française multiplié par 2, soit le ¼ de la France métropolitaine.

Tableau 7. Evolution des superficies forestières mondiales entre 1980 et 1990 (en milliers d'ha)

Régions	**1980**	**1990**	**Evolution annuelle (000 ha)**	**%**
Afrique	585 252	545 089	-4 016	-0,7
Asie *dont Asie du S.E*	504 835 *247 346*	489 672 *219 318*	-1 527 *2 803*	-0,3 *-1,3*
Océanie	82 035	88 254	-125	-0,1
Europe	877 319	895 155	+239	0,0
Amérique du N. et du C.	546 187	531 276	-1 491	-0,3
Amérique du Sud	954 779	892 929	-6 185	-0,7
Total	3 550 407	3 442 375	-13 105	-0,4

Sources : FAO, 2000, 1999 et 1997

Tableau 8. Evolution des superficies forestières mondiales entre 1990 et 2000 (en milliers d'ha)

Régions	**1990**	**2000**	**Evolution annuelle 1990-2000 (000 d'ha)**	**%**
Afrique	702 475	649 839	-5 262	-0,8
Asie *dont Asie du S.E*	530 595 *235 203*	524 084 *211 914*	-650 *-2 328*	-0,1 *-1,1*
Océanie	201 176	197,537	-364	-0,2
Europe	1 051 321	1 062 952	+1 167	0,1
Amérique du N. et du C.	555 002	549 304	-570	-0,1
Amérique du Sud	922 731	885 618	-3 711	-0,4
Total	3 963 300	3 869 334	-9 390	-0,2

Sources : FAO, 2001a, b

III. Le recours à la télédétection pour améliorer les évaluations

Les premières initiatives d'utilisation de la télédétection à des fins de mesure de l'étendue du couvert forestier datent des années 1980. Comme nous l'avons indiqué dans les pages précédentes, dès l'évaluation de 1980, la FAO opte pour l'utilisation parallèle d'images satellites dans le but de remédier à l'insuffisance de l'appareillage statistique des inventaires forestiers dans la plupart des pays tropicaux. Une interprétation manuelle est conduite sur des scènes Landsat MSS au 1 /1000 000 couvrant six pays d'Amérique du Sud, deux d'Afrique et quatre d'Asie (FAO, 2001b). L'expérience est reprise lors des évaluations ultérieures, en particulier pour estimer les changements survenus dans les couvertures forestières entre deux années de référence. D'une manière générale, l'apport de la télédétection pour l'évaluation des superficies de forêts tropicales peut être appréhendé à trois niveaux de découpage : continental, régional et local.

III.1. Télédétection et évaluations aux niveaux continental et régional

Les images fournies par les satellites à large champ, typiquement NOAA AVHRR et Spot 4 VEGETATION, sont de plus en plus mises à contribution pour produire des cartes du couvert végétal à petite échelle, entre 1 /500 000 et 1/5000 000. Les travaux effectués dans le cadre de la première phase du projet TREES (*Tropical Resources and Environement Observations by Satellites*), s'inscrivent dans cette optique. Des scènes à résolution spatiale de l'ordre du kilomètre sont compilées et traitées pour mettre en évidence l'étendue des massifs forestiers tropicaux et les modifications qu'ils subissent sous forme de déforestation. Les enregistrements à résolution spatiale plus haute (Landsat MSS et TM, Spot XS), sont utilisés pour valider les interprétations et les classifications obtenues.

Cette approche à petite échelle permet de cartographier les zones écologiques et de repérer les fronts de déforestation massive ou « points chauds[4] » de déforestation (Mayaux et Lambin, 1997 ; Lambin et Ehrlich, 1997 ; D'Souza et Malingreau, 1993 ; Malingreau et *al*., 1989). Les cartes de végétation de l'Afrique centrale, de l'Asie du Sud-Est et de l'Amérique du Sud, ont été établies suivant cette procédure (Achard et *al*., 2001 et 1998 ; Laporte et *al*., 1998 et 1995).

Les images Spot 4 VEGETATION offrent de nouvelles possibilités d'évaluation et de suivi du couvert forestier tropical depuis 1998. Suivant les procédures d'assemblage et de validation similaires à celles mises en place pour l'exploitation cartographique des images NOAA AVHRR, des cartes du couvert végétal de l'Asie du Sud-Est (Stibig et *al*., 2001) et de Madagascar (Mayaux et *al*., 2000) ont été établies.

Une autre méthode d'évaluation à petite échelle consiste à utiliser les images à haute résolution spatiale (Landsat, Spot, IRS) sur un échantillon de sites, et à généraliser ensuite les résultats à l'ensemble d'un continent ou d'une zone écologique, par extrapolation statistique. La deuxième phase du projet TREES expérimente cette approche (Mayaux et *al*., 1998). La FAO a également procédé ainsi pour évaluer les superficies forestières et leur diminution dans les régions tropicales, en parallèle avec les inventaires forestiers nationaux (FAO, 2001b et 1996 ; Blasco, 1990).

Au Brésil, l'Institut National de Recherches Spatiales (INPE) compile régulièrement les images Landsat de l'Amazonie brésilienne et publie les chiffres à la suite du traitement de ces images[5]. Ces chiffres rendent compte de l'ampleur de la déforestation et suscitent souvent de vives polémiques, en raison des conflits d'intérêts et des enjeux politiques, économiques et géostratégiques autour de la forêt amazonienne (Léna, 1999). Rappelons qu'avec 5,8 millions de km² (soit près de 0,6 milliards d'hectares), la forêt amazonienne est le plus grand massif forestier tropical

[4] traduction française des expressions anglaises « deforestation hot spot » et « active deforestation area » (fig.2, p. 33).
[5] Nous reviendrons sur ces chiffres dans le chapitre 6 consacré à la mise en évidence des dynamiques de défrichement en Amazonie.

du monde. Plus de 60 % de cette étendue (soit 3,4 millions de km²) se trouve au Brésil.

La comparaison des évaluations dérivées d'images à faible résolution spatiale et de celles issues des inventaires classiques, montre que ces derniers ont tendance à surestimer l'étendue des forêts. Ainsi, alors que les images NOAA AVHRR indiquent 1,11 milliards d'hectares de forêts tropicales pour la période de référence 1992-1994, les inventaires forestiers réalisés dans les mêmes régions font état d'une superficie de 1,35 milliards d'hectares pour l'année 1995 (tabl. 9). La quantification basée sur les images satellites donne une surface inférieure de 244 millions d'hectares à celle obtenue par les inventaires classiques, soit une différence de 22 %. Il s'agit là d'une tendance générale qui cache cependant quelques disparités intra-régionales, car d'autres comparaisons montrent que pour certains pays tropicaux, ce sont les inventaires forestiers qui ont tendance à sous-estimer les superficies forestières. C'est notamment le cas de la République Démocratique du Congo où l'estimation fondée sur les images NOAA est supérieure de 6 % à celle fournie par l'inventaire forestier national (Laporte et *al.*, 1995). Cette divergence des chiffres est sans doute en rapport avec la qualité des images et des inventaires au sol (Mayaux et *al.*, 1998).

Dans les cas où l'évaluation par télédétection est fondée sur un échantillon d'images à haute résolution spatiale, la comparaison des résultats avec ceux issus d'inventaires classiques montre également que ces derniers surestiment les superficies. Ainsi, pour l'année 2000, la FAO fait état d'une surface forestière tropicale totale de 1,8 milliards d'hectares selon les inventaires forestiers classiques, contre 1,4 milliards d'hectares mesurée sur la base d'un échantillon d'images Landsat, Spot et IRS, soit une différence de 328 millions d'hectares. Cette différence moyenne représente 22 % du chiffre total issu des calculs effectués sur les images satellites et varie de 16 % pour l'Amérique latine à 29 % pour l'Asie (tabl. 10).

La tendance des inventaires classiques à « grossir » les chiffres fait en sorte que l'évaluation à l'aide d'images de haute résolution spatiale fournisse des superficies

largement inférieures à celles obtenues par les inventaires classiques. En Afrique, la différence entre les deux modes d'évaluation porte jusqu'à 136 % de la superficie indiquée par les images, contre 20 % en Asie et 7 % en Amérique latine (tabl. 11).

Tableau 9. Superficies des forêts tropicales obtenues par inventaires forestiers et par traitements d'images NOAA AVHRR (en milliers d'ha)

	FAO (1995) inventaires	**TREES (1992-1994) NOAA AVHRR**	**Différence 000 ha**	**%**
Afrique centrale	204 677	183 967	+20 710	11,3
Afrique de l'Ouest	46 324	17 589	+28 735	163
Asie du Sud-Est continentale	70 163	64 481	+5 682	8,8
Asie du Sud	77 137	21 810	+55 327	253
Asie du Sud-Est insulaire	132 466	173 690	-41 224	24
Amérique du sud	827 946	652 772	+175 174	27
Total	1 358 713	1 114 309	+244 404	22

Sources : FAO (1997) pour les données d'inventaires
Mayaux et *al.* (1998) pour les données NOAA

Tableau 10. Comparaison des superficies forestières tropicales obtenues par télédétection et inventaires classiques en 2000 (millions d'ha)

Régions	**Superficies forestières**		**Différence**	
	d'après les inventaires classiques	d'après les images Spot, TM et IRS	000 000 d'ha	%
Afrique	622	484	+138	28
Asie	289	224	+65	29
Amérique latine	892	767	+125	16
Total Tropiques	1803	1475	+328	22

N.B. Pour des raisons de comparaison, on a exclu de ce tableau les statistiques de certains pays non pris en compte dans l'échantillon d'images satellites.
Source : FAO, 2001b

Tableau 11. Comparaison de l'étendue de la déforestation tropicale mesurée par télédétection et par inventaires classiques en 2000 (millions d'ha)

Régions	**Déforestation annuelle**		**Différence**	
	d'après les inventaires classiques	d'après les images satellite Spot, TM et IRS	000 000 d'ha	%
Afrique	5,2	2,2	+3	136
Asie	2,4	2,0	+0,4	20
Amérique latine	4,4	4,1	+0,3	7
Total Tropiques	12,0	8,3	+3,7	44

N.B. Pour des raisons de comparabilité, on a exclu de ce tableau les statistiques de certains pays non pris en compte dans l'échantillon d'images satellites.
Source : FAO, 2001b

Les évaluations par télédétection montrent de nombreuses disparités entre elles, même pour les régions et les années de référence identiques ou proches (Mayaux et *al*. 1998 ; Laporte et *al*, 1995). Cependant, les méthodes mises en œuvre, ainsi que la nature des données utilisées, les rendent plus consistantes que les évaluations classiques, car la précision peut être aisément évaluée, contrairement aux inventaires dont le degré de fiabilité est difficile à estimer notamment dans les pays du Sud. Toutefois, les évaluations par télédétection au niveau continental et/ou régional demeurent relativement imprécises, bien qu'elles permettent de localiser et de visualiser les zones touchées par la déforestation. Du fait de la résolution spatiale des images, les documents cartographiques produits offrent une vue globale et instantanée, souvent limitée à la discrimination du binôme forêt/non forêt, sans indication sur les types d'occupation du sol compris dans le vocable déforestation. De plus, en dépit des efforts récents de la FAO et du projet TREES, les dynamiques de déforestation sont rarement mises en évidence, d'où l'absence de véritables cartes d'évolution spatio-temporelle de la déforestation à petite échelle. Qu'en est-il de l'utilisation de la télédétection pour des quantifications au niveau local ?

III.2. Télédétection et évaluations au niveau local

Avec l'augmentation progressive de la résolution spatiale des images, qui est passée de 80 m en 1972 pour Landsat MSS à 10 m aujourd'hui pour Spot 5 en mode multispectral et 5 m en mode panchromatique, les études sur la déforestation tropicale au niveau local se multiplient. Elles proposent des diagnostics à des dates données, ainsi que des analyses diachroniques pour expliquer l'évolution du phénomène. En plus des enregistrements satellites, les photographies aériennes sont parfois utilisées. Il s'en suit une précision accrue dans les mesures du taux de déforestation, et des détails sont fournis sur la nature des parcelles qui ont remplacé la forêt : villes, villages, champs, etc. Par ailleurs, on observe une grande variabilité des rythmes annuels de déforestation : 1,6% dans les régions densément peuplées d'Afrique centrale (Fotsing, 1992), 0,3 % dans les régions enclavées de Guyane française (Tsayem et *al.*, 2002), et jusqu'à 4 % sur les fronts pionniers de l'Etat du Rondônia en Amazonie brésilienne (Imbernon, 1999a), ou encore dans la région de Maya au Guatemala (Sader et *al.*, 2001).

Les résultats obtenus suggèrent la complexité du phénomène et tendent à relativiser son ampleur en mettant en évidence les processus de recul et de reprise de la forêt ici et là. Ainsi, pour la forêt dense humide de la région de Bertoua au Cameroun, les calculs réalisés sur les images Landsat TM font état d'un taux annuel de déforestation de 0,5 % (Mertens et Lambin, 1997). Dans la même région, l'analyse des photographies aériennes couplées aux images satellites récentes, révèle une dynamique du couvert végétal caractérisée par une lente progression de la forêt aux dépens de la savane adjacente (Youta-Happi, 1998 ; Youta-Happi et Bonvallot, 1996). Sur la base des données de télédétection, la vitesse annuelle de cette reforestation est estimée à environ 1 % pour la période 1950-1989. Une tendance similaire est observée dans les régions forestières de la République Démocratique de Congo (Runge et Neumer, 1996).

D'une manière générale, à l'échelon local (soit aux échelles inférieures au 1/60 000), l'analyse de la déforestation est davantage affinée grâce à la télédétection. Les

caractéristiques spatiales des parcelles sont décrites de manière qualitative et quantitative, ce qui permet de mieux apprécier le poids des défrichements agricoles par rapport à l'ensemble des causes invoquées pour expliquer la déforestation en milieu tropical (Imbernon et Branthomme, 2001 ; Imbernon, 2000 ; Mertens et Lambin, 2000 ; Eden, 1996 ; N'Guessan, 1993 et 1990 ; Fotsing, 1992 ; Pouyllau et *al.*, 1990). A ce niveau d'observation, les études s'attachent également à élaborer des systèmes d'information géographique (SIG) qui permettent d'analyser la structuration spatiale des parcelles déforestées, en prenant en compte des facteurs comme la proximité des routes, des lieux d'habitation, les cours d'eau et les marchés (Mertens et *al.*, 2000 ; Imbernon, 1999a ; MCCracken et *al*, 1999 ; Tsayem, 1999). Ce type d'approche est utilisé dans le souci de contribuer à une meilleure gestion de l'occupation du sol. Les SIG débouchent parfois sur la simulation et la construction de modèles de prédiction de l'évolution de la déforestation (Veldkamp et Lambin, 2001 ; Mertens et *al.*, 2001 ; Guerra et *al.*, 1998 ; Mertens et Lambin, 1997)[6].

Toutefois, il convient de relever que ces études demeurent très parcellaires et peu replacées dans la dynamique régionale des milieux concernés. Par ailleurs, l'approche par emboîtement d'échelles, consistant à aller du régional au local et vice versa (Fotsing, 1998 ; Hubschman, 1994), est peu développée. Les chercheurs se limitent très souvent aux juxtapositions de niveaux d'analyse, sans véritable transfert ni d'un type d'image à un autre, ni d'une échelle donnée à une autre. L'imagerie optique (visible et infra rouge) est davantage utilisée, en dépit de la couverture nuageuse qui réduit considérablement les possibilités d'exploitation de ce type de données. Que peut l'imagerie radar face à cette contrainte météorologique ?

III.3. Quid du radar dans les régions tropicales ?

Afin d'établir les cartes thématiques au 1 /250 000 et évaluer les ressources naturelles de l'ensemble de l'Amazonie brésilienne, une campagne d'acquisition d'images radar (projet RADAM : RAdar d'AMazonie) a été réalisée dans les années 1970 (Tricart, 1992). Plus récemment, d'autres campagnes

[6] La modélisation de la déforestation tropicale est abordée de manière plus approfondie dans le chapitre deux.

d'acquisition ont été organisées avec les satellites européens (ERS et désormais Envisat), japonais (JERS) et canadiens (Radarsat). Malgré la multiplicité de ces images radar, elles demeurent peu utilisées en comparaison avec les images optiques. Cette sous utilisation s'explique en partie par la spécificité des images radar qui rend leur interprétation moins intuitive que celle des images acquises dans le visible et l'infrarouge (Polidori, 1997). Par ailleurs, les techniques de traitement et d'analyse demeurent difficiles a mettre en œuvre, et ne donnent pas encore de résultats très satisfaisants en ce qui concerne la détection et la quantification de la déforestation et des changements d'occupation du sol (Rudant et *al*, 1997 ; Strozzi et Wegmüller, 1997 ; Ponsard et *al*, 1995 ; Proisy, 1995). Le caractère « tout temps » de l'acquisition de ces images représente pourtant un avantage considérable pour les applications de la télédétection en milieu tropical humide.

L'Agence Spatiale Européenne a développé récemment une méthode dite ILU (*Interférométric Land Use*) ; elle consiste à réaliser des compositions colorées de tandem d'images radar, combinant la cohérence interférométrique, l'intensité moyenne et la différence d'intensité. De la sorte, on parvient à mettre en évidence les sols nus et les parcelles déforestées correspondant à la stabilité de phase entre les tandems d'images. Si la méthode paraît satisfaisante pour la détection de la déforestation, elle présente cependant quelques insuffisances et nécessite des améliorations notamment en ce qui concerne l'identification et l'analyse thématique de l'information géographique que contient l'instabilité de phase.

En définitive, la télédétection se décline en plusieurs systèmes d'acquisition d'images utilisées à des fins d'évaluation de l'étendue des forêts et de la déforestation. Même si elles paraissent peu cohérentes, les évaluations classiques à l'exemple de celles qui sont conduites sous l'égide de la FAO, donnent une idée générale des superficies forestières et leur recul. Le recours à la télédétection complète les inventaires classiques et permet d'améliorer les quantifications. D'une manière générale, la panoplie des évaluations amène à s'interroger sur la signification des chiffres et des

pourcentages publiés. A quelle réalité géographique correspondent-ils ? Quel sens donner au mot « superficie » lorsqu'on a affaire à un paysage qui tantôt s'étend de manière continue, tantôt apparaît très morcelé ? Les bilans globaux ne masquent-ils pas des structures spatiales hétérogènes et complexes ?

CHAPITRE 2

COMPLEXITE DU PHENOMENE GEOGRAPHIQUE DE DEFORESTATION EN MILIEU TROPICAL

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, mesurer la déforestation, évaluer ses incidences sur le climat et la biodiversité, projeter l'horizon de la disparition des forêts tropicales, apparaissent de plus en plus au devant des préoccupations de la communauté internationale. Ces thèmes sont privilégiés alors que la compréhension du phénomène suscite encore de nombreuses interrogations. En effet, que recouvre le terme *déforestation* en milieu tropical ? Comment ce phénomène se traduit-il dans les lieux où il se déroule ? Quels sont les processus qui expliquent son occurrence et modulent son évolution dans le temps et l'espace ? A ces questions, il n'est pas évident de trouver des réponses dans l'abondante littérature consacrée au sujet. Traité régulièrement par les médias, on n'en retient généralement que l'image simpliste des incendies spectaculaires dévastant les forêts d'Afrique, d'Amazonie ou d'Asie.

L'objectif de ce chapitre est de circonscrire la notion *déforestation* à la lumière de nos lectures et connaissances sur les milieux forestiers tropicaux d'Afrique et d'Amazonie. Ainsi, après un rappel des différentes approches d'étude de la déforestation, nous montrerons comment ce concept et les assertions sous-jacentes ont émergé et se sont perpétués dans le temps. Cette démarche nous amènera à revisiter un certain nombre d'idées reçues à propos des forêts tropicales et des causes couramment invoquées pour expliquer leur régression.

I. Approches d'étude de la *déforestation* en milieu tropical

La *déforestation* en milieu tropical est abordée de manière différente par les disciplines scientifiques et les catégories d'acteurs (organismes de coopération, ONG,

etc.). Les paragraphes qui suivent ont pour finalité de synthétiser les diverses approches d'étude de ce phénomène géographique, depuis sa définition jusqu'à la modélisation de ses processus.

I.1. La *déforestation* : un concept imprécis

D'après les dictionnaires courants (Le Petit Larousse, le Petit Robert), la déforestation est synonyme de déboisement, c'est à dire l'action qui consiste à détruire la forêt. Reflétant la perception populaire, cette définition mécaniste et simplificatrice souligne le caractère imprécis du concept. Les chercheurs qui étudient la déforestation en milieu tropical privilégient tantôt les aspects purement écologiques (Roussel, 1999), tantôt agro-écologiques (Michon et Bouamrane, 2000 ; Verdeaux et Alpha, 1999 ; Lénonard et Oswald, 1996) ou socio-historiques (Fauroux, 2000 ; Moizo, 2000).

Ainsi, pour les écologues, la déforestation signifie diminution ou perte de biodiversité forestière (Puig, 2001a,b). Elle correspond au passage du couvert végétal d'un état « naturel » à un état artificialisé pouvant se traduire par la perturbation du fonctionnement de l'écosystème. Les agro-écologues et les ethno-botanistes envisagent le phénomène comme un processus complexe d'enrichissement végétal et de succession culturale alternant couverts forestiers et cultures vivrières associées (Michon et *al*., 2000 ; Emperaire et Lescure, 2000 ; Dounias, 1996). Quant aux Sciences Sociales parmi lesquelles la Géographie, elles abordent le sujet sous l'angle des rapports entre les sociétés et leur cadre de vie, privilégiant la manière par laquelle les activités humaines s'insèrent dans l'espace forestier et participent à sa dynamique (Bahuchet et *al*., 2000 ; Civilisations, 1997).

D'un point de vue pratique, les experts et les organismes internationaux, intéressés surtout par l'aspect quantitatif, définissent la déforestation comme étant la transformation ou la conversion des forêts en d'autres types de couvert, désormais plus ou moins dépourvus de végétation ligneuse. Impulsée par l'accroissement

démographique, la déforestation en milieu tropical correspondrait en ce sens au défrichement définitif de la forêt et à son remplacement par les champs, les villages, les pâturages, les villes, les aménagements hydriques, les infrastructures routières et les autres formes d'utilisation anthropique de l'espace. Pour la FAO par exemple, la déforestation « *implique la disparition durable ou permanente du couvert forestier ainsi que le passage à une autre utilisation des terres (…). Elle inclut aussi les cas où la surexploitation et la modification de l'environnement affectent la forêt de façon telle qu'elle ne peut maintenir un couvert arboré dépassant le seuil de 10 pour cent* » (FAO, 2001, p. 137). Toutefois, cet organisme précise que le terme « *exclut spécifiquement les zones où les arbres ont été enlevés par exemple pour en exploiter le bois et où la forêt devrait se régénérer soit naturellement, soit avec l'aide de mesures sylvicoles* ». En d'autres termes, l'exploitation forestière n'entre pas dans les catégories de déforestation. Par ailleurs, dans ses rapports sur la situation des forêts dans le monde, la FAO utilise souvent l'expression « dégradation forestière » pour désigner « *les changements de catégorie de forêt affectant négativement le peuplement ou le site, et abaissant ainsi sa capacité de production de biens et/ou de services* ». Cette perception confère aux forêts une valeur marchande.

La variété des acceptions que recouvre le terme *déforestation*, et donc l'imprécision de son contenu sémantique, appellent à une grande prudence dans l'emploi de l'expression. Cette situation souligne la difficulté qu'il y a à trouver une définition synthétique, car la réalité géographique exprimée par le concept peut être différente d'un lieu à un autre, et très hétérogène dans le même espace. De nombreux chercheurs, et en particulier les géographes, ont eu recours à la modélisation, d'une part pour cerner de manière plus explicite le contenu de la *déforestation*, d'autre part pour expliquer les mécanismes qui la sous-tendent.

I. 2. La modélisation de la déforestation en milieu tropical

I.2.1. Bases théoriques : entre malthusiens et antimalthusiens

Les travaux de Malthus ont donné naissance à la théorie dite malthusienne selon laquelle la détérioration de l'environnement est le résultat de

l'accroissement de la population humaine. D'après cette conception des rapports Homme-milieu, l'augmentation de la population provoquerait une compétition entraînant l'amenuisement des ressources de la Terre. Cette situation pourrait à son tour déboucher sur la baisse des rendements et l'accélération de la mortalité. C'est le fameux « cercle vicieux de dégradation » (Rossi, 2000). Ce postulat a été largement repris au 20ème siècle dans un certain nombre de publications, faisant émerger le « néo-malthusianisme ». L'ouvrage de Ehrlich (1968) intitulé *The population bomb*[1], et le rapport *Meadows* publié en 1972 sous le titre *Halte à la croissance*, s'inscrivent dans ce courant de pensée qui annonçait « l'ère de pénurie » pour la fin des années 1980. C'est dans cette mouvance que des prédictions écologiques catastrophistes ont situé à court terme l'horizon de la disparition des forêts tropicales.

Face à cette théorie s'est développée la thèse de Boserup (1965) qui soutient que, suite à une baisse des rendements que peut provoquer le raccourcissement de la durée des jachères, les paysans adoptent des stratégies nouvelles parmi lesquelles l'intensification agricole. Pour les tenants de cette thèse, l'augmentation de la population n'est pas synonyme absolu de dégradation de l'environnement et de consommation accrue de l'espace. Cette position a permis le développement du courant dit « antimalthusien » dont un des fondements est l'ouvrage de J. Simon - *l'Homme, notre dernière chance* (traduction française parue en 1985). Cet auteur postule que la croissance démographique s'accompagne d'innovations et de progrès, sources de richesses et de solutions pour résoudre les problèmes auxquels la Terre est confrontée. Ainsi, pour ce qui est des régions tropicales, cette théorie tend à montrer que la pression démographique peut susciter une meilleure prise en compte des risques environnementaux, ainsi que l'adoption de stratégies nouvelles en vue de mieux gérer les ressources (Tchawa, 1997 et 1991 ; Tiffen et *al*., 1994).

Les théories de Malthus et de Boserup ont servi de cadres de réflexion et engendré des approches permettant d'analyser les rapports entre les sociétés du Sud et leur

[1] dont la traduction française est *La bombe P*

milieu de vie. Toutefois, en ce qui concerne plus précisément la déforestation, aucune de ces deux théories n'offre à elle seule une explication exhaustive permettant de bien l'appréhender. En effet, l'occurrence et le développement du phénomène semblent impliquer un jeu important de paramètres et de processus qui relèvent tant des pratiques socio-culturelles que du contexte historique, économique et géopolitique, aussi bien à l'échelon local, national qu'international. Des recherches récentes, combinant réflexion conceptuelle et études de terrain, ont développé plusieurs modèles explicatifs de ces processus de déforestation.

I.2.2. Les modèles de déforestation en milieu tropical

La littérature scientifique recèle trois catégories de modèles qui formalisent les processus de déforestation en milieu tropical : les modèles empiriques basés sur l'observation des phénomènes, les modèles mécanistes qui se fondent sur la connaissance des processus, et les modèles systémiques portant sur la formulation mathématique des interactions entre les processus complexes (tabl. 12).

Tableau 12. Principaux modèles de déforestation

1. Modèles empiriques	2. Modèles mécanistes	3. Modèles systémiques	
modèles de régression	modèles de croissance démographique et économique	modèles écosystémiques et de simulation des dynamiques spatiales	**Expliquent les causes**
chaînes markoviennes et fonctions logiques			**Expliquent les processus**
modèles spatiaux et statistiques	modèles de mutations péri-urbaines	modèles de simulation des dynamiques spatiales	**Prédisent les endroits exposés à la déforestation**

Source : adapté de Lambin, 1994

D'une manière générale, ces modèles visent trois principaux objectifs : la compréhension des causes et des mécanismes de changement du couvert forestier, la prédiction de l'évolution spatio-temporelle de ces changements, et la recherche de solutions préventives (Lambin, 1997 et 1994). Ils prennent en compte des paramètres qui ressortent des théories de Malthus et/ou de Boserup : l'accroissement démographique et les besoins en terres cultivables, la demande des produits

forestiers (marché du bois tropical), la situation géographique des forêts, l'accessibilité par les routes ou les fleuves, etc. Certains modèles ont pour ambition de mettre ces paramètres en interrelation afin de bien cerner les processus, alors que d'autres proposent des simulations pour décrire l'évolution du phénomène et faire des projections (FAO, 1995).

D'après Lambin (1994), ces modèles doivent permettre de trouver des réponses aux questions suivantes : quelles variables culturelles et environnementales expliquent au mieux la déforestation et les processus écologiques et socio-économiques qui la sous-tendent ? Quel est le rythme de propagation spatiale du phénomène ? Où sont localisées les forêts les plus exposées aux défrichements ?

La modélisation se heurte à la disponibilité des données et au choix des variables socio-économiques associées aux facteurs d'occurrence de la déforestation. Ces variables sont difficilement quantifiables, mais leur importance est considérable dans le déroulement de phénomènes combinant dynamiques anthropiques et dynamiques biologiques, et ce à différentes échelles de temps et d'espace. En fonction du contexte géographique et des modes d'occupation du sol, il est nécessaire de combiner plusieurs modèles afin d'appréhender de manière globale l'ensemble des processus qui conduisent à la déforestation (fig. 3). L'intégration de plusieurs modèles (modèle de colonisation agricole, modèle de Von Thünen, etc.) permet de prendre en compte la diversité des types d'occupation du sol (agriculture de subsistance, péri-urbanisation, exploitation forestière, etc.). Dans cette optique, les données de télédétection alimentent certains modèles et servent aussi à les valider (Mertens et Lambin, 2000 ; Mertens et Lambin, 1997).

L'effort de modélisation montre que la déforestation en milieu tropical engage un jeu important de facteurs et de processus plus ou moins interconnectés. Il est toutefois symptomatique que la plupart des modèles l'envisagent en tant que processus irréversible de défrichement, et n'intègrent pas dans leurs modèles les recrus forestiers post-culturaux qui conduisent dans bien de cas à la reforestation.

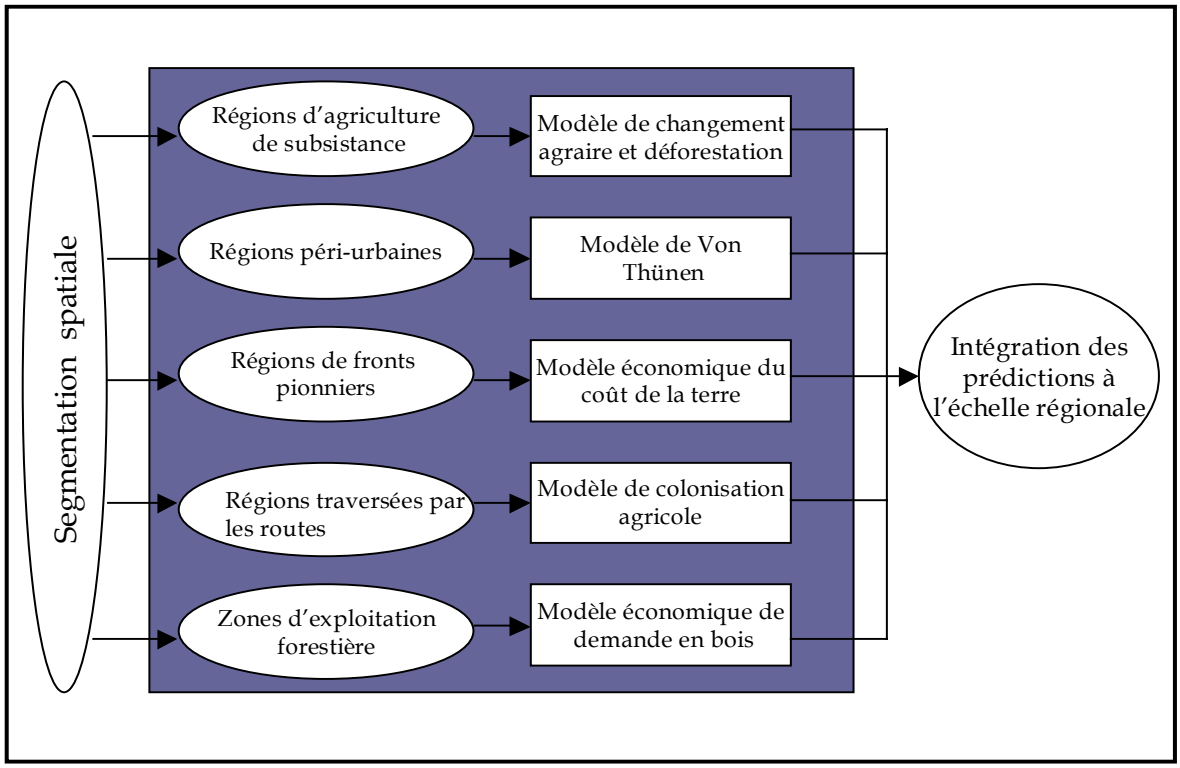
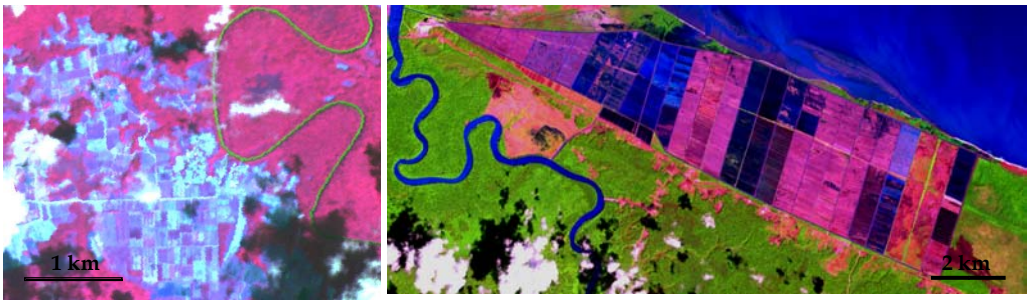


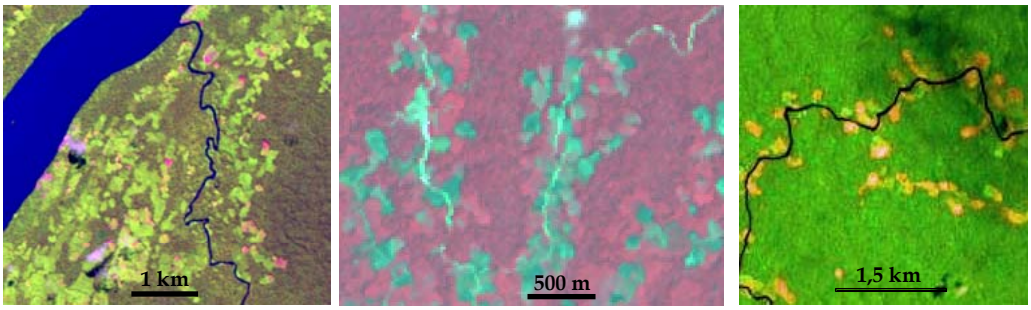
Figure 3. Modélisation des processus de déforestation tropicale et intégration des modèles à l'échelle régionale (adaptée de Mertens et Lambin, 1997)

Au-delà de la variabilité des modèles, la déforestation en milieu tropical, au sens de passage du couvert forestier à un autre type de couvert, apparaît comme une réalité géographique inscrite à l'interface entre les implantations humaines (villes, terroirs, champs, routes, etc.) et les étendues de forêts denses environnantes. Vu sous cet angle, le phénomène présente une grande diversité et paraît simple. En Guyane française et au Brésil, il relève tantôt d'opérations non concertées d'aménagement du territoire, tantôt d'opérations concertées (fig. 4). Les premières se caractérisent par une occupation spontanée et souvent anarchique, tandis que les deuxièmes conduisent à une occupation organisée de l'espace. Quoi qu'il en soit, la déforestation en milieu tropical est un sujet d'inquiétude car elle est considérée comme un fléau écologique. Comment en est-on arrivé à de telles considérations ?



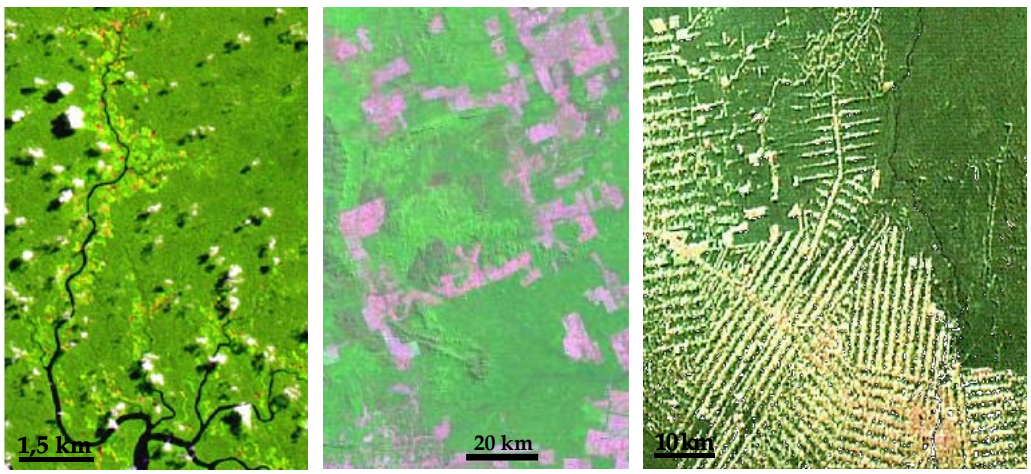
a. Opérations concertées d'occupation agricole du sol en Guyane française.

A gauche : parcelles de cultures à Javouhey. A droite : casiers rizicoles à Mana.
Notez la régularité du tracé du parcellaire.



b. Opérations non concertées d'occupation agricole du sol en Guyane et au Brésil.

A gauche et au milieu : défrichements traditionnels en Guyane française (Apatou et Maripasoula).
A droite : petite agriculture familiale dans le Nord du Brésil (État de l'Amapa).
Notez le caractère quelconque du parcellaire



c. Colonisation agricole de types spontané et planifié au Brésil.

A gauche : petite agriculture familiale dans l'État du Para. Au milieu : colonisation agricole en lots privés dans le Para. A droite : fronts pionniers planifiés par l'État dans le Rondônia.

Source des images: CNES, LRT, INPE et USGS

Figure 4. Formes de déforestation résultant d'opérations concertées et non concertées d'occupation agricole du sol en forêt amazonienne

II. De la forêt « vierge » à la forêt défrichée : une évidence construite ?

Depuis quelques décennies, les forêts tropicales occupent le devant de la scène en ce qui concerne la représentation des problèmes environnementaux. Pourtant, elles ont été considérées pendant longtemps comme des formations végétales intactes et répulsives à toute présence humaine. Les lignes qui suivent ont pour but de présenter l'évolution de la perception des forêts tropicales à partir du recoupement de diverses sources bibliographiques. Il s'agit de décrire comment le discours sur la déforestation s'est peu à peu substitué au mythe de la forêt « vierge ».

II.1. La virginité des forêts tropicales : un mythe prégnant

Dès leurs premiers contacts avec les forêts denses humides des régions tropicales au 15ème siècle, les explorateurs et missionnaires européens ont considéré ces formations végétales comme étant « vierges », c'est à dire à l'abri de toute présence humaine notable, et donc non soumises à l'incidence des activités anthropiques. Les faibles densités de population humaine dans ces contrées lointaines confortaient sans doute cette perception. Jusqu'à la fin du 19ème siècle, les récits de voyages en Afrique font état de « l'extraordinaire richesse des paysages » et de leur « indescriptible beauté ». Cette vision lyrique des forêts tropicales s'explique probablement par le fait qu'au moment où les premiers explorateurs les découvrent, ils font le rapprochement avec les forêts tempérées et boréales d'Europe, déjà massivement défrichées à des fins agricoles et industrielles depuis le Moyen-Age.

Le mythe de la virginité des forêts denses humides d'Outre Mer va longtemps imprégner l'imaginaire occidental et servir de postulat aux premières missions scientifiques effectuées dans ces régions. Ainsi, dans l'actuel Bénin, palmiers à huile, cocotiers, manguiers, orangers, ananas, sont repérés par Repin (1863) dans « *ces forêts que jamais n'a frappées la hache* », tandis que le botaniste Chevalier procède en 1920 à la cartographie de la « *grande forêt vierge de l'Afrique Occidentale Française* », en

mentionnant le riz et le palmier à huile dans sa liste de productions « naturelles » (Rossi, 1999).

Les recherches récentes à caractère multidisciplinaire, associant notamment les approches anthropologique, archéologique, palynologique et sédimentologique, apportent des données nouvelles permettant d'une part, de dater l'insertion des groupes humains dans les régions forestières tropicales et d'autre part, de retracer l'évolution de ce couvert végétal en rapport avec les changements climatiques et/ou les activités anthropiques. L'équipe ECOFIT[2] a ainsi établi que les forêts denses africaine et amazonienne, en réaction aux changements climatiques, ont subi des modifications considérables durant le Quaternaire récent. De toute évidence, un recul brutal de la bordure forestière est intervenu entre 2800 et 2000 ans *BP*[3] en Afrique Centrale Atlantique (Ouest et Sud-Ouest du Cameroun, Sud et Ouest du Congo). Les enregistrements palynologiques et sédimentologiques indiquent qu'après 2000 ans *BP*, une extension de la forêt a eu lieu dans l'Ouest et le Sud-Ouest du Cameroun. Ce phénomène s'est poursuivi jusqu'au 20ème siècle, avec des fluctuations plus ou moins importantes (Maley, 1990). Par ailleurs, une étude conduite par Schwartz et *al*. (1997) établit que depuis maintenant 500 ans, la forêt dense africaine reconquiert les îlots adjacents et progresse sur ses marges, malgré la présence plus ou moins négligeable des activités humaines (Youta Happi, 1998).

En ce qui concerne l'Amazonie, les travaux récents montrent que la présence de l'homme y remonte à 6000 ans *BP*. Bien avant le peuplement post-colombien à partir du 16ème siècle, le bassin amazonien était habité par les Amérindiens qui vivaient en petits groupes aussi bien sur les côtes qu'à l'intérieur, le long des fleuves et sur les interfluves (Grenand P. et F., 1997). L'agriculture traditionnelle itinérante y aurait commencé à partir de 3000 ans *BP*. Les fouilles archéologiques menées en Guyane française ont permis de relever qu'à l'instar du peuplement amérindien, l'agriculture

[2] Ecosystèmes et Paléo-écosytèmes Forestiers InterTropicaux, équipe de recherche CNRS-IRD, associant les Universités de Yaoundé I au Cameroun et de Brazzaville au Congo.
[3] Before Present, c'est à dire avant l'Actuel, celui-ci ayant pour année de référence 1958

traditionnelle n'était pas confinée dans des endroits précis, mais essaimait sur l'ensemble du territoire.

Par ailleurs, l'analyse des pollens de *Cecropia* de la région des Nouragues en forêt dense au Centre de la Guyane, met en évidence deux phases d'ouverture de la forêt amazonienne au cours des 3000 dernières années (Ledru et *al*., 1997). La première se situe entre 2124 et 1679 *BP*, et la seconde entre 658 et 424 *BP*. Ces ouvertures sont dues aux conditions climatiques sèches, combinées à l'action anthropique, ce qu'attestent du reste les analyses anthracologiques (Tardy, 1996). Les auteurs de cette étude concluent que « *l'incidence combinée de ces deux facteurs a certainement modelé le paysage végétal actuel* ». C'est dire que la forêt amazonienne telle qu'on la voit aujourd'hui, n'est pas uniquement la résultante d'un façonnement et d'une histoire naturels, mais sans doute aussi le reflet d'une présence humaine ininterrompue mais variable dans le temps.

En dépit de ces résultats scientifiques qui améliorent les connaissances sur les interactions pluriséculaires entre les forêts tropicales et les populations qui les habitent, on remarque que le mythe de la forêt vierge est encore présent dans certains esprits. Dans le sillage des recommandations du sommet de Rio, de nombreuses études continuent d'inventorier les endroits où les « forêts vierges et biologiquement intactes » subsistent ou sont en voie de disparition. Ainsi, citant le *World Ressources Institute*, Roper et Roberts (1999) dressent un tableau contenant la liste et l'étendue des territoires occupés par les forêts *vierges* dans les pays en développement. Même en Europe de l'Ouest et du Nord, des organismes comme le Fonds Mondial pour la Nature (1994) ou la FAO (1997) font état de la présence des « *forêts vierges et des forêts naturelles et anciennes semi-naturelles* », sans qu'on sache exactement ce que recouvrent ces termes. Cependant, à ces représentations occidentales initiales s'est succédé peu à peu un discours tendant à montrer que les forêts tropicales subissent les actions destructives des populations locales. Comme le suggère Rossi (2000), il est intéressant de resituer le contexte qui a présidé à la construction et à la perpétuation de ce postulat.

II.2. L'émergence du discours sur la déforestation tropicale

Dès le début du 20ème siècle, pour conforter le processus de colonisation des contrées d'Outre Mer, les explorateurs Européens rapportent à l'attention de leurs métropoles non plus « l'exceptionnelle beauté des paysages », mais les menaces que font peser sur les ressources forestières dites naturelles, les « *peuplades qui errent en forêt, ignorant et fuyant l'organisation en villages, … tirant de la forêt où ils vivent à la façon des bêtes sauvages les seules ressources que celle-ci produit* » (Julien, 1911, cité par Bergeret, 1993). Dès lors, les activités de subsistance de ces populations indigènes sont qualifiées de prédatrices et inappropriées. Répétant les méthodes utilisées au 19ème siècle à l'encontre des populations des montagnes françaises, les pratiques agricoles et pastorales traditionnelles sont indexées dans les colonies comme étant des actions « inconscientes » et « irresponsables », à l'origine d'une déforestation « générale » et « galopante ».

Ce constat justifie alors l'intervention du corps des forestiers qui ne tarde pas à identifier sa « bête noire », le véritable « ennemi invétéré » de la forêt : l'indigène, avec ses défrichements, ses feux de brousse, ses pâturages, etc. (Mangin, cité par Bergeret, 1993). Dans ce contexte, accordant peu d'importance à l'hypothèse paléoclimatique, les botanistes qui entreprennent des études sur le terrain n'hésitent pas à présenter les savanes comme résultant de la destruction de la forêt par les incendies des agriculteurs et des éleveurs. En évoquant notamment l'exemple d'Aubréville qui a effectué de minutieuses études sur les savanes d'Afrique de l'Ouest, Rossi (1999) montre comment un véritable « récit de crise » a été construit par la suite : incendie – déforestation – érosion – cuirassement - désertification. Les agriculteurs et éleveurs pratiquant la technique de défriche-brûlis deviennent alors les principaux coupables de la dégradation du couvert végétal. Par conséquent, les services forestiers coloniaux préconisent une politique de défense/protection/conservation/restauration, fondée sur le reboisement et l'établissement des réserves et périmètres protégés, dont l'accès est interdit aux populations locales.

Après les indépendances politiques des anciennes colonies, cette politique forestière s'est poursuivie sous la houlette des services forestiers nationaux, sur la base des mêmes préceptes non démontrés. D'après l'expression de Bergeret (1995), la doctrine et les politiques des forestiers coloniaux n'ont pas cessé de « rejeter de souche ». Les espaces protégés, sous les statuts de parcs, de périmètres de reboisement et de réserves forestières, se sont multipliés en particulier dans les pays africains. Une évaluation récente de la FAO, fondée sur les statistiques nationales et les données du Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE), indique que 12,4 % des forêts du monde se trouvent sur des espaces ayant un statut « d'aires protégées », d'après la nomenclature de l'Alliance Mondiale pour la Conservation de la Nature (UICN). 26,5 % de ces forêts protégées se situent en zones tropicale et subtropicale (tabl. 13).

Tableau 13. Répartition des forêts situées dans les aires protégées suivant les zones écologiques

Zones écologiques	Superficie forestière totale (millions d'ha)	Forêts situées dans les aires protégées	
		(millions d'ha)	%
Tropicales	1 997	304	15,2
Subtropicales	370	42	11,3
Tempérées	507	83	16,3
Boréales	995	49	5,0
total	3,86	479	12,4

Source : FAO (2001b)

Pour ce qui est des reboisements, très souvent, ce sont des essences exotiques à croissance rapide qui sont plantées, même si elles ne s'intègrent pas harmonieusement aux stratégies locales d'utilisation de l'espace (Tchawa et Tsayem, 2002). Cette pratique va de pair avec la mise en place d'une législation souvent très restrictive et répressive. De nos jours encore, les populations autochtones des zones forestières tropicales sont parfois considérées comme des squatters coupables de déforestation et de dégradation de leur environnement. Or, les études montrent que leurs pratiques traditionnelles sont inféodées au milieu et participent depuis des milliers d'années à la dynamique des paysages (Bahuchet et *al.*, 2000). Malgré ces

études, on a l'impression que pour certains programmes internationaux, tout se passe comme s'il fallait absolument extirper l'homme de la forêt tropicale pour assurer la préservation de celle-ci. Nombreux sont encore les ONG, les bailleurs de fonds et les organismes de coopération qui continuent de fonder leurs politiques d'environnement et de développement sur cette conception désarticulée des rapports entre les populations du Sud et leur cadre de vie, persuadés que l'agriculture itinérante sur brûlis provoque une déforestation massive. Qu'en est-il réellement ?

III. L'amalgame sur l'agriculture itinérante sur brûlis

L'histoire rurale de l'Europe montre qu'entre le Moyen-Age et le 15ème siècle, voire le 19ème, les forêts tempérées ont été énormément déboisées et converties en espaces agraires (Diry, 1999 ; Mazoyer et Roudart, 1997 ; Bertrand, 1975). Issus de cette période, le terme « essarts » et ses dérivés font référence aux grands défrichements qui ont provoqué alors une déforestation de grande ampleur. Parallèlement à la construction du discours sur la déforestation dans les régions tropicales, un rapprochement hâtif a été fait entre les techniques agricoles traditionnelles utilisées par les populations autochtones de ces régions, et celles employées en Europe durant l'époque médiévale. Ainsi est né l'amalgame qui continue encore de nos jours de faire passer l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis comme « principale » ou « première » cause de la diminution des superficies forestières sous les tropiques. Cette situation entraîne une confusion qui repose non seulement sur la profusion et l'imprécision du vocabulaire agronomique, mais aussi sur la méconnaissance de ce système agraire et ses différentes variantes.

III.1. Une terminologie agricole foisonnante

De nombreux termes sont généralement employés pour désigner les défrichements agricoles opérés en milieu forestier tropical. Grenand F. (1996) en donne un échantillon : « agriculture temporaire », « agriculture itinérante », « agriculture semi-itinérante », « agriculture itinérante sur brûlis », « agriculture de défriche sur brûlis », « agriculture forestière », « agroforesterie », « horticulture sur

brûlis », « essartage », « jardin », etc. Ils émanent pour l'essentiel de l'expression anglaise *swidden* ou *shifting cultivation*, remis en usage par Izikowitz en 1951 à partir du mot suédois *svedja*, pour nommer « les modes de culture sur brûlis avec longue jachère en milieu forestier » (Barrau, 1972). Traduite en français par « culture itinérante » ou « agriculture itinérante », elle s'est révélée peu appropriée pour nommer les systèmes agricoles de défriche-brûlis-jachère pratiqués par les populations des régions forestières tropicales. En effet, « agriculture itinérante » fait allusion au déplacement de la parcelle mise en culture, et n'insiste pas sur le défrichement par le feu et la mise en jachère qui suit l'exploitation de la parcelle cultivée. De plus, cette expression, associée ou non à la notion de brûlis, peut laisser penser à une consommation abusive d'espace. De la sorte, et surtout pendant l'époque coloniale, elle a donné lieu à plusieurs expressions connexes pas toujours dénuées de préjugés : « culture ambulante », « culture nomade », « vagabondage cultural », etc.

Le mot « écobuage » est aussi utilisé comme synonyme d'agriculture itinérante sur brûlis en milieu tropical. Faisant remarquer qu'il ne suggère ni le déplacement de la parcelle cultivée, ni la pratique de la jachère, Barrau (1972) le déconseille et préconise l'usage du mot « essart » comme traduction française de « *shifting cultivation* ». D'après cet auteur, même si le vocable essart relève du vocabulaire des techniques agraires de l'Europe médiévale, il permet un grand nombre de déclinaisons et fait bien allusion au défrichement par brûlage et à l'observation d'une longue jachère forestière. Grenand F. et Haxaire (1977) ont pourtant récusé ce terme, car il sous-entend la notion d'arrachage et fait surtout référence aux pratiques agricoles européennes de défrichement et de mise en culture permanente. Or, précisent-elles, l'agriculture traditionnelle sur brûlis sous les tropiques humides repose essentiellement sur la régénération de la forêt à partir des souches d'arbres non arrachés pendant le défrichement et le brûlage.

D'autres auteurs, tel Jacques-Felix (1947), ont proposé l'usage des noms vernaculaires pour désigner ces systèmes agricoles traditionnels : *ray* en Indochine, *ladang* en

Indonésie, *tavy* à Madagascar, *roça* au Brésil, etc. Toutefois, comme l'indique Grenand F. (1996), cette option présente le risque d'être incomprise au-delà des frontières linguistiques de l'emploi du vocable. On peut pallier à cette lacune en décrivant les systèmes agricoles traditionnels de manière fine et comparative.

En Guyane française, les groupes ethniques pratiquent une agriculture itinérante nommée « abattis ». C'est un mot créole hérité du français parlé pendant la colonisation de la Guyane. Il désigne de manière appropriée les défrichements traditionnels itinérants sur brûlis, car il évoque la technique d'abattage des arbres qui caractérise la préparation des parcelles à cultiver. Bien que les dictionnaires usuels le définissent comme « une coupe faite dans un bois », lui déniant ainsi toute connotation agricole, ce mot a été adopté par les scientifiques qui étudient les systèmes agricoles de défriche-brûlis (Tsayem et *al*., 2002 ; Betsch, 2001 ; Bahuchet et *al*., 2000 ; Manusset, 1999 ; Gély, 1986 et 1984 ; Grenand, F. et Haxaire, 1977).

A cette panoplie de mots s'ajoute l'expression « front pionnier » qui fait référence aux défrichements de grande emprise spatiale amorcés dans les années 1970 en Amérique du Sud. Rappelons que les défrichements du type de ceux qu'ont connus les forêts françaises au 13ème siècle, ou la côte ouest-américaine au 19ème siècle, étaient d'un ordre de grandeur similaire. L'expression pourrait aussi s'appliquer au développement des plantations de rente, aux dépens de la forêt, dans plusieurs pays tropicaux au lendemain des indépendances (Ouest de la Cote d'Ivoire, Sud-Ouest du Cameroun). Aussi désignés « frontière agricole » en Amazonie, ces défrichements émanent initialement d'une volonté politique de « mise en valeur moderne» de l'espace forestier par distribution de lots essentiellement aux migrants (Droulers, 1995). L'amalgame sur l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis provient de la confusion qui l'assimile aux défrichements de type front pionnier opérés généralement en situation de conquête de nouvelles terres et de colonisation agricole définitive, dans une logique productiviste et marchande.

Au total, la littérature scientifique regorge d'une multitude d'expressions aux contenus plus ou moins variables et pouvant prêter à confusion à propos des défrichements agricoles dans les régions forestières tropicales. D'ailleurs, ces expressions sont souvent utilisées à tort et à travers pour aborder la déforestation. Ce faisant, on pointe un doigt accusateur sur « l'agriculture itinérante sur brûlis », sans préciser s'il s'agit du type traditionnel ou du type front pionnier.

III.2. L'agriculture itinérante traditionnelle : « bouc-émissaire » de la déforestation en milieu tropical

Pour de nombreux experts et consultants d'organismes internationaux, l'agriculture itinérante sur brûlis est la principale cause du péril qui menace les forêts tropicales et par delà la terre entière. Ainsi, dans un rapport du Réseau des Conseillers Forestiers de l'Agence Canadienne pour le Développement International (ACDI) préparé par Roper et Roberts (1999), la « culture sur brûlis » est indexée comme étant la première des « causes directes » de la déforestation. «A *l'échelle mondiale, les plus importants agents de la déforestation, et de loin, sont les agriculteurs qui pratiquent la culture sur brûlis et qui vivent au sein ou à l'orée des forêts tropicales du monde. On estime que les petites exploitations agricoles familiales sont responsables de près de deux tiers de la déforestation* », écrivent les auteurs de ce rapport.

Pour le *Consultative Group on International Agricultural Research* (CGIAR, 1996), « *nearly half of Earth's remaining 5 billions acres (2 billions hectares) of tropical forests could be lost to agriculture, mostly to poor farmers (...), the main threat to tropical forests comes from poor farmers who have no other option to feeding their families other than slashing and burning a patch of forest and growing food crops until the soil is exhausted after a few harvests, which then forces them to move on to a new patch. Slash–and-burn agriculture results in the loss or degradation of some 25 millions acres of land per year (10 millions hectares*[4]*)* ».

[4] Près de la moitié des 2 milliards d'ha de forêts tropicales qui restent pourraient être perdues à cause de l'agriculture, et notamment par le fait de pauvres cultivateurs (…), la principale menace sur les forêts tropicales vient des pauvres agriculteurs qui n'ont pas d'autre alternative pour nourrir leurs familles que couper et incendier des portions de forêt et cultiver la terre jusqu'à ce qu'elle s'épuise, ce qui les contraint à partir et défricher d'autres

Quant à l'*International Centre for Research on Forestry* (ICRAF, 2000), il indique que «*shifting cultivation (slash-and-burn agriculture) is estimated to account for 70 % of deforestation in Africa, 50 % in Asia and 30 % in Latin America*[5]». Sur la base de ce constat, il propose un programme alternatif consistant en l'intensification de l'utilisation du sol pour réduire la pauvreté et améliorer le bien-être des populations des zones forestières tropicales !

Outre le présupposé sur l'agriculture traditionnelle, la terminologie agricole peu explicite fait en sorte que tous les types d'agriculture tropicale sont englobés et la déforestation est dès lors imputée aux « small and poor farmers ». Or, la rentabilité économique, au sens où la civilisation occidentale la met en avant, n'est pas le but premier des agriculteurs traditionnels des régions tropicales. Ils sont de ce fait incompris et confondus aux agriculteurs itinérants de circonstance, qui participent à la course à la terre pour faire des bénéfices et constituer une épargne comme on peut l'observer sur certains fronts pionniers du Brésil.

Il est symptomatique qu'aucun reproche ne soit fait par exemple à l'endroit de l'exploitation forestière industrielle menée dans de nombreux pays. Très peu d'études ont été consacrées à l'évaluation de l'impact environnemental de cette activité commerciale qui consiste à prélever dans les forêts denses tropicales les essences les plus rentables économiquement. La FAO (1997) la considère comme « *l'une des principales interventions de tout aménagement* », visant à « *réaliser les objectifs de production mais aussi à structurer la forêt de l'avenir* » (p.25) ! Elle contribue pourtant à la déforestation comme le montrent de nombreuses études (Mertens et *al.*, 2000 ; Pasquis, 1999 ; Pomel et Salomon, 1998 ; Fearnside, 1991). Il semble d'ailleurs qu'au-delà des causes les plus souvent invoquées, la déforestation en milieu tropical soit étroitement liée aux choix politiques et économiques de certains pays et des groupes forestiers internationaux (Becker, 2001 ; Karsenty, 1999 ; Rossi, 1999 ; Fearnside,

portions. L'agriculture itinérante sur brûlis entraîne la perte ou la dégradation d'environ 10 millions d'hectares de terre par an.

[5] On estime que l'agriculture itinérante sur brûlis provoque 70 % de la déforestation en Afrique, 50 % en Asie et 30 % en Amérique latine.

1997). Quant à l'agriculture traditionnelle, les études récentes démontrent qu'elle n'est pas forcément synonyme de destruction irréversible des forêts tropicales

III.3. Une pratique agricole pourtant écologiquement viable ?

L'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis concerne une population estimée à 12 millions de personnes appartenant à près de 1500 ethnies (tabl. 14). C'est le mode d'exploitation agricole le plus répandu de la zone intertropicale, si on prend pour critère d'appréciation le nombre de personnes qui la pratiquent (Dounias, 2000). Cette population se retrouve en majorité en Indonésie (près de 5 millions de personnes) et en Afrique centrale (3 millions de personnes). En Amazonie, elle ne représente que 2,3 % de l'ensemble de la population des provinces forestières, soit 700 000 personnes. Cette situation s'explique par le déclin démographique de la population amérindienne qui est autochtone de l'Amazonie. Ce déclin a fait suite au contact avec les Occidentaux au 16ème siècle, et s'inverse depuis quelques décennies (Grenand P., 2000).

L'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis se caractérise par une grande richesse du matériel végétal cultivé par différents groupes ethniques (tabl. 15) : 44 à 92 variétés de riz, 61 à 76 variétés de manioc, 32 à 80 variétés d'igname, etc.

Les études scientifiques minutieusement menées sur le terrain soulignent le caractère bénin et non perturbateur, au sens écologique, de cette pratique agricole des populations autochtones des régions forestières tropicales. Des synthèses récentes en rendent compte (Dounias, 2000 ; Rossi, 2000 ; Bahuchet et *al*., 1994). D'après Gély (1984), c'est un système agricole inscrit à l'intérieur du cycle « sylvigénétique naturel ». F. Grenand (1996) ajoute qu'il est « perdurable » et « auto-régénérant », car « *la reconstitution du couvert forestier fait partie intégrante de ce système agricole* [et] *partout où les conditions sont réunies pour une exploitation traditionnelle de la forêt, la reconstitution du couvert forestier est toujours le but ultime que se fixe l'agriculteur tropical* » (p. 41).

Tableau 14. Population des régions forestières et ethnies pratiquant l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis

Régions forestières*	Population totale	Population forestière	%	Nombre d'ethnies forestières indigènes
Afrique centrale	54 000 000	3 000 000	5,5	150
Amazonie**	30 400 000	700 000	2,3	234
Philippines	62 400 000	1 600 000	2,6	52
Malaisie Péninsulaire	14 600 000	100 000	0,9	19
Indonésie***	170 700 000	4 800 000	2,8	95
Bornéo	12 500 000	950 000	7,6	62
Nouvelle-Guinée	5 400 000	1 000 000	18,5	806
Total	350 000 000	12 150 000	3,5	1418

* L'Amérique centrale, l'Inde et l'Asie du Sud-Est continentale ne sont pas prises en compte
** population totale des provinces forestières, et non des pays entiers
*** Non compris Irian Jaya (pris en compte dans Nouvelle-Guinée) et Kalimantan (compté dans Bornéo)
Source : Bahuchet, 1997.

Tableau 15. Diversité des plantes cultivées par les ethnies autochtones des régions forestières tropicales

Groupes ethniques	Banane	Igname	Manioc	Pandanus	Patate	Riz	Taro
Maring (Papouasie N-G)	28	32		34			
Mvae (Cameroun)	17						
Wussi (Vanuatu)		80					
Caboclos (Bresil)			61				
Wayâpi (Guyane fr.)			31				
Kuikuru (Brésil)			46				
Makushi (Guyana)			76				
Daribi (Papouasie N-G)					17		
Hanunoo (Phillipines)						92	
Kantu (Bornéo)						44	
Yafar (Papouasie N-G)							20

Synthèse adaptée de Dounias, 2000

Dans la région de Sumatra en Indonésie, Michon et *al*. (1995) montrent que dans le cadre d'un système traditionnel associant les cultures vivrières et une espèce ligneuse locale (le *damar*), la reconstitution de la forêt se traduit par la conservation de 50 % de la biodiversité initialement en place (avant le défrichement et la mise en culture). En ce qui concerne la durée du processus de reconquête forestière, Lescure (1986) a relevé que les caractères du couvert arborescent (densité du peuplement, répartition des diamètres ou des hauteurs, phytomasse et organisation dans l'espace)

sont reconstitués en une centaine d'années après agriculture traditionnelle sur brûlis chez les Amérindiens *Wayâpi* du Haut Oyapock en Guyane française.

La multitude de faciès post-culturaux amène à considérer l'agriculture itinérante sur brûlis comme une technique agricole qui contribue à enrichir la biodiversité locale (Carrière, 2002 ; Carrière et *al*., 2002a et b ; Lescure, 1997). Cette observation dément l'idée selon laquelle cette pratique est responsable d'une déforestation irréversible. Il faut cependant reconnaître que ce n'est que dans des conditions bien précises que ses effets sont bénins. Parmi ces conditions, les plus décisives sont l'étendue de l'espace forestier disponible et le poids démographique de la population concernée. Du fait que cette agriculture est essentiellement itinérante et implique par conséquent un abandon de la parcelle arrivée en fin d'exploitation, suivi d'un nouveau défrichement dans la forêt environnante, elle nécessite un territoire de superficie considérable pour une pratique écologiquement viable. Ceci est d'autant plus crucial que ce territoire doit en outre être utilisé pour les autres activités de subsistance : chasse, cueillette et pêche.

Pour ce qui est des densités démographiques dans les régions forestières tropicales, elles sont généralement faibles : de l'ordre de 7 habitants au km² en Afrique, et 3 en Amazonie. Mais les densités réelles dans les zones d'agriculture traditionnelle sont encore plus faibles : autour de 1 habitant au km² (Bahuchet et *al*., 1994 ; Gély, 1986 et 1984 ; Juillerat, 1983 ; Grenand P., 1981 ; Podselver, 1980). Un seuil de 15 à 23 habitants au km² apparaît comme la limite appropriée pour une pratique agricole traditionnelle écologiquement viable (Rossi, 1999 ; Pomel et Salomon, 1998 ; Dufumier, 1996). Le contexte socio-économique et politique, notamment le droit foncier et la finalité de la production qui doit être destinée prioritairement à l'autoconsommation, est aussi un facteur de grande importance pour une pratique de l'agriculture itinérante sur brûlis participant au maintien ou à la régénération des forêts.

Tous ces développements montrent que la déforestation en milieu tropical est en réalité un phénomène géographique dont les causes, les facteurs et les processus sont plus complexes que ne le laissent présager les images et les mythes (Geist et Lambin, 2002 ; Lambin et *al*., 2001). Pour notre part, nous avons choisi d'aborder le problème à partir d'exemples précis : les défrichements agricoles en Amazonie. Il ne s'agit ni de restreindre le contenu du terme déforestation en le limitant aux seuls défrichements agricoles, ni d'éviter de lui donner une définition, qui ne peut d'ailleurs être que générique. Il s'agit simplement de traiter de cas concrets qui posent des problèmes d'aménagement du territoire et de gestion du foncier en Guyane française et au Brésil.

CHAPITRE 3

LES DEFRICHEMENTS AGRICOLES EN FORET AMAZONIENNE : ETAT DES LIEUX

Près de la moitié de l'étendue des forêts tropicales se trouve en Amérique du Sud, soit 885 millions d'hectares. D'après la FAO, 3,7 millions d'hectares de ces forêts sont perdus chaque année suite à la déforestation, ce qui représente une diminution annuelle de 0,4 %. Cette déforestation affecte principalement le plus grand massif forestier tropical du monde : l'Amazonie, qui occupe un demi milliard d'hectares. Les défrichements agricoles sont considérés, à tort ou à raison, comme la plus importante cause de cette déforestation, à côté de l'orpaillage, de l'exploitation forestière et de l'extension des villes.

Comment ces défrichements agricoles sont-ils mis en place ? Quels sont les facteurs qui expliquent leur extension spatiale ? Nos relevés de terrain, ainsi que les données issues d'enquêtes agricoles et de recensements démographiques officiels, vont nous permettre de répondre à ces questions. Il ne s'agit pas de faire un inventaire précis des défrichements, mais de les décrire dans le but de reconnaître leurs signatures spatiales et spectrales sur les images satellites dans l'étape suivante de ce travail. L'attention sera portée essentiellement sur les fronts pionniers au Brésil et les abattis en Guyane française, les deux principaux modes de colonisation agricole de la forêt amazonienne[1].

I. Les fronts pionniers au Brésil : un choix politique à l'origine

Les fronts pionniers au Brésil découlent du mouvement de colonisation agricole qui s'inscrit dans le cadre de la politique d'appropriation de l'étendue du

[1] On remarquera que nous avons traité les abattis de manière plus approfondie que les fronts pionniers. Cela tient au fait que cette étude était initialement consacrée exclusivement aux abattis (cf. explications fournies dans l'introduction générale et le chapitre 1).

territoire occupée par la forêt amazonienne. Celle-ci s'étend au Nord du continent sud-américain, essentiellement sur les territoires du Brésil, de la Guyane française, du Surinam et du Guyana. Son extension est limitée sur les franges Est et Ouest par une mosaïque de paysages constitués de forêts décidues, de savanes et de défrichements agricoles. Ces défrichements ne se situent pas seulement aux marges de la forêt. Ils parcourent sous forme linéaire l'intérieur du massif forestier amazonien (fig. 5).

La politique d'utilisation agricole de la forêt amazonienne du Brésil a débuté en 1953 avec la création de l'Amazonie Légale[2]. La forêt amazonienne, considérée alors par le gouvernement fédéral comme un immense « espace vide », doit être insérée dans le territoire national. Un programme d'ouverture des routes principales (les transamazoniennes) est mis en place, suivi d'incitations à la colonisation pionnière de la forêt. Cette volonté politique s'affirme dès 1970 avec le programme d'intégration nationale qui consiste à donner la terre aux migrants venant majoritairement du *Nordeste*. La gestion de cette opération publique d'aménagement planifié du territoire est confiée à l'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire).

Après la construction des axes routiers principaux, des parcelles de forêt à défricher sont distribuées en lots de 100 ha par famille dans un périmètre de 100 km le long des routes (Fleury, 2000). Par la suite, les axes routiers secondaires sont ouverts et les défrichements essaiment aux alentours, en même temps que se développent des agglomérations rurales appelées « agrovilles ». En une dizaine d'années, c'est plus d'une centaine de milliers de migrants qui bénéficient d'un accès à la terre, principalement pour la production vivrière (manioc, riz, petit élevage). La figure 6a illustre les différentes étapes de mise en place de cette politique d'occupation agricole de la forêt. Sur un espace forestier de 3500 km², la colonisation agricole s'est progressivement étendue entre 1975 et 1992 dans l'Etat du Rondônia à l'Ouest du

[2] L'expression Amazonie Légale désigne les Etats fédérés du Brésil dont le territoire est recouvert de forêt amazonienne devant faire l'objet de défrichements agricoles organisés ; il s'agit des Etats de l'Amazonas, du Para, de l'Acre, du Rondônia, du Roraima, de l'Amapa, d'une partie du Maranhao, du Mato Grosso et du Goias, soit environ 5 à 6 millions de km²

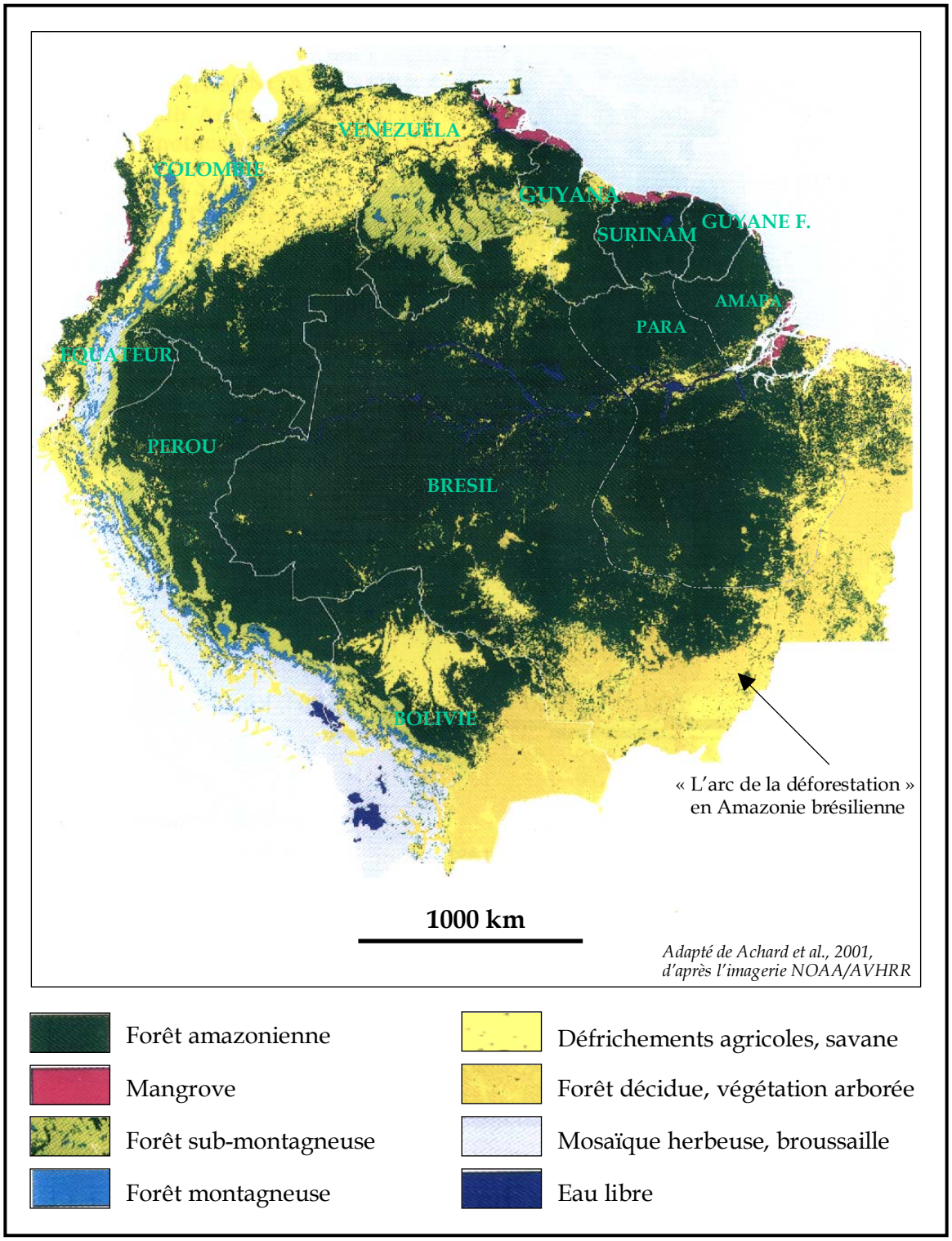
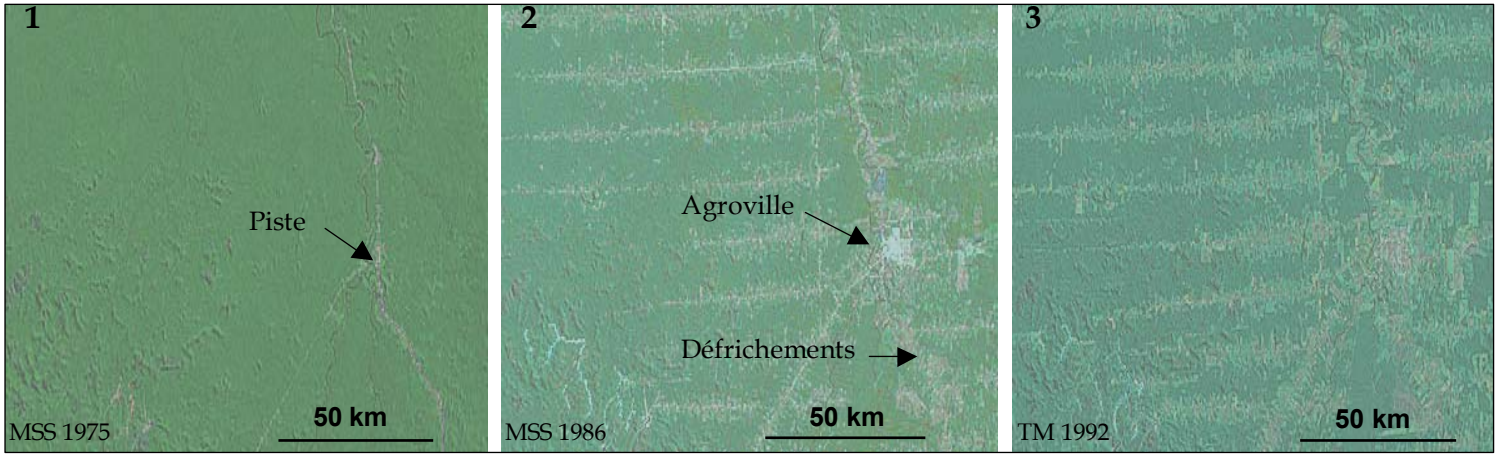
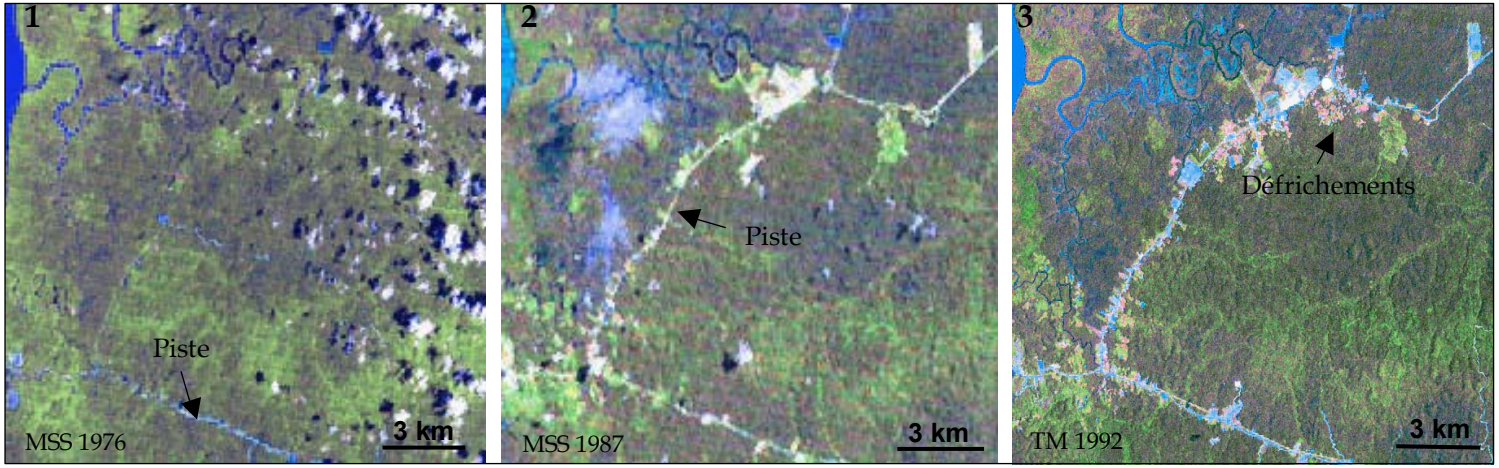


Figure 5. Les défrichements agricoles au sein de la forêt amazonienne

N.B. A ce niveau d'observation, la Guyane française apparaît comme un territoire entièrement recouvert de forêt. Les abattis sont imperceptibles à cette échelle, en raison de leurs surfaces très réduites



a. Processus de colonisation agricole de type front pionnier planifié : un exemple dans l'État du Rondônia au Brésil



b. Processus de colonisation agricole de type abattis en Guyane française : l'exemple de la région de Charvein

Stades de défrichement : 1- Ouverture d'une piste principale dans la forêt; **2-** Ouverture d'axes secondaires et défrichements aux alentours; **3-** Propagation des défrichements à partir du réseau des pistes.Notez la différence d'ampleur entre les deux processus dès le stade 2. *Sources des illustrations : CNES (TM 1992); INPE-LRT (MSS 1976 et 1987); USGS (MSS l975 et 1986, TM 1992).*

Figure 6 : Mise en place et évolution des défrichements agricoles en forêt amazonienne

Brésil. L'ouverture d'une piste principale dans la forêt est suivie de la création d'une « agroville » et de la multiplication de pistes secondaires . Dès lors, les défrichements agricoles essaiment et morcellent la forêt.

Quelques années après le démarrage de ces opérations planifiées, l'accès à la grande propriété foncière s'est développé davantage grâce aux facilités bancaires et fiscales proposées par l'Etat brésilien. Les grands propriétaires (les *fazendeiros*), venant essentiellement du Sud du Brésil, ont acquis des domaines parfois précédemment occupés de manière précaire par les petits propriétaires et les ethnies autochtones (les *posseiros*, les *caboclas*). On est ainsi passé des fronts pionniers publics (défrichements planifiés et réalisés sous la houlette des structures de l'Etat) aux fronts pionniers privés (défrichements réalisés par des particuliers sur de grands domaines fonciers). Ces derniers se sont répandus surtout au Sud des Etats du Para, du Mato Grosso et du Rondônia, formant ainsi un « arc de la déforestation » (cf. fig. 5).

L'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis, ainsi que la colonisation agricole par parcelles de quelques hectares distribuées aux migrants, a été progressivement submergée par les grands ranchs qui dépassent parfois 10 000 ha (Léna, 1986 ; Levêque, 1986). Sur ces immenses étendues, la forêt est défrichée de manière radicale et définitive et cède la place aux pâturages permanents (planche 1). On estime que l'élevage extensif est responsable de 70 % du déboisement de la forêt amazonienne (Fearnside, 1997).

Au total, en Amazonie brésilienne, trois types de déforestation par l'agriculture sont imbriqués dans l'espace (cf. fig. 4c, p. 52) : l'agriculture itinérante traditionnelle pratiquée par les autochtones, le défrichage définitif de grande envergure pour l'élevage bovin productiviste (front pionnier issu de la colonisation privée), et les défrichements opérés dans le cadre de la politique de colonisation agricole publique élaborée par l'Etat au profit des migrants « sans terre ». Seul le premier type de déforestation est comparable à ce qui s'observe en Guyane française.

a. Vue partielle d'une fazenda près de Belém dans l'État du Para.
Au premier plan : clôture en fil barbelé délimitant le pacage. Au second plan: forêt dense.

b. Terrain de parcours bovin s'étendant à perte de vue (premier plan) **aux dépens de la forêt dense** (second plan)**; État du Para.**

Clichés: Moïse Tsayem, novembre 2000

Planche 1. Les fronts pionniers au Brésil : défrichements définitifs et installation des pâturages

II. Les abattis en Guyane française : un grignotage de la forêt

L'abattis est une variante traditionnelle de l'agriculture itinérante sur brûlis pratiquée par la quasi-totalité des populations qui vivent en milieu forestier guyanais. Quelles sont les caractéristiques spatiales de cette utilisation agricole de la forêt ? Dans quel contexte socio-économique évolue-t-elle ? Les développements qui suivent vont répondre à ces questions. Nous aborderons d'abord les modalités de mise en place des abattis, puis le cadre géographique et le contexte démographique dans lesquels ils s'inscrivent, et enfin la part de ce type de défrichement dans le paysage agricole de la Guyane française.

II.1. Modalités de mise en place et caractéristiques spatiales des abattis

La mise en place des abattis relève d'opérations spontanées d'occupation agricole du sol. Il s'agit généralement de défrichements non planifiés. Comme dans le cas des fronts pionniers, l'ouverture d'une route donne le coup d'envoi des défrichements (fig. 6b). Mais contrairement aux fronts pionniers, les abattis ne se propagent pas dans l'espace de manière inconsidérée ; ils sont cantonnés le long des pistes. Pour décrire cette forme de colonisation agricole, nous allons utiliser les paramètres suivants : le site et la situation géographique, les états de surface, la taille et la forme des parcelles.

II.1.1. Sites et situations des abattis

Comme le montre la figure 6b, l'accessibilité est un des principaux critères pris en compte dans le choix du site à défricher. Elle explique pourquoi les abattis sont situés préférentiellement aux abords des routes, des pistes, des cours d'eau et des bourgs. Ces défrichements touchent différents types de terrain, en fonction de la nature des plantes cultivées, et des conditions hydro-pédologiques locales (planche 2). Pour les cultures qui ont besoin d'eau pour croître (*dachines* par exemple), ce sont les sites hydromorphes de bas fonds qui seront défrichés (photo 2a). Lorsque les cultures nécessitent un sol bien drainé, ce sont les versants qui sont défrichés (photos 2b, c et d). Le choix des sites dépend de la topographie et du

a. Dachines en contre bas, brûlis récent sur le versant, bananiers au sommet, forêt dense en arrière plan; Cacao, avril 2002.

b. Friche herbeuse en contre bas, bananiers sur le versant, forêt dense en arrière plan. La flèche signale la piste; Cacao, avril 2002.

c. Un abattis de bananiers qui grignote la forêt au bord de la route conduisant à Cacao (avril 2002).

d. Demi-oranges défrichés en bordure du fleuve *Oyapock* à Saint-Georges (novembre 2000).

Clichés: Moïse Tsayem, avril 2002 (photos a,b et c) et novembre 2000 (photo d).

Planche 2. Sites et situations des abattis

drainage à tel point que les agriculteurs utilisent les termes « abattis terre haute », «abattis terre basse » et « abattis marécage » pour différencier leurs parcelles.

II.1.2. Etapes de mise en place et états de surface des abattis

Le déroulement des opérations d'abattis est calqué sur le rythme climatique (fig. 7). Le calendrier agricole s'ouvre par le sabrage qui intervient dès la fin de la saison des pluies en juillet. Cette première opération consiste à rendre moins touffu le site choisi pour accueillir l'abattis. Les arbustes et les herbes sont éliminés au moyen de la machette appelée localement « sabre ». Après ce travail préliminaire effectué en août, les arbres sont abattus en septembre et brûlés en octobre ; ils sont coupés au niveau de la base, et les souches sont laissées sur place. Le brûlage nettoie la parcelle et l'enrichit d'une couche de cendre. Ces tâches successives correspondent à la première étape du calendrier agricole et conduisent à un état de surface caractérisé par la présence de souches et de troncs d'arbres calcinés qui jonchent le sol (planche 3a).

La deuxième étape porte essentiellement sur la mise en culture des parcelles défrichées et brûlées (planche 3b). Elle intervient dès le début de la saison des pluies, vers mi-novembre, et s'étend jusqu'en janvier. Le manioc est la plante la plus cultivée. Toutefois, il existe des abattis de patate, de maïs, de dachine, d'ananas, de bananier, etc. Les états de surface sont très variés en raison de cette diversité des cultures. Mais d'un point de vue physionomique, il s'agit de parcelles qui ont une densité élevée de plantes, même si le taux de recouvrement du sol par les cultures est souvent assez faible. En général, une seule culture occupe l'essentiel de la surface défrichée, mais de plus en plus, d'autres cultures sont introduites de manière dispersée dans les abattis. En février, le sarclage est effectué pour éliminer les mauvaises herbes qui font concurrence aux cultures.

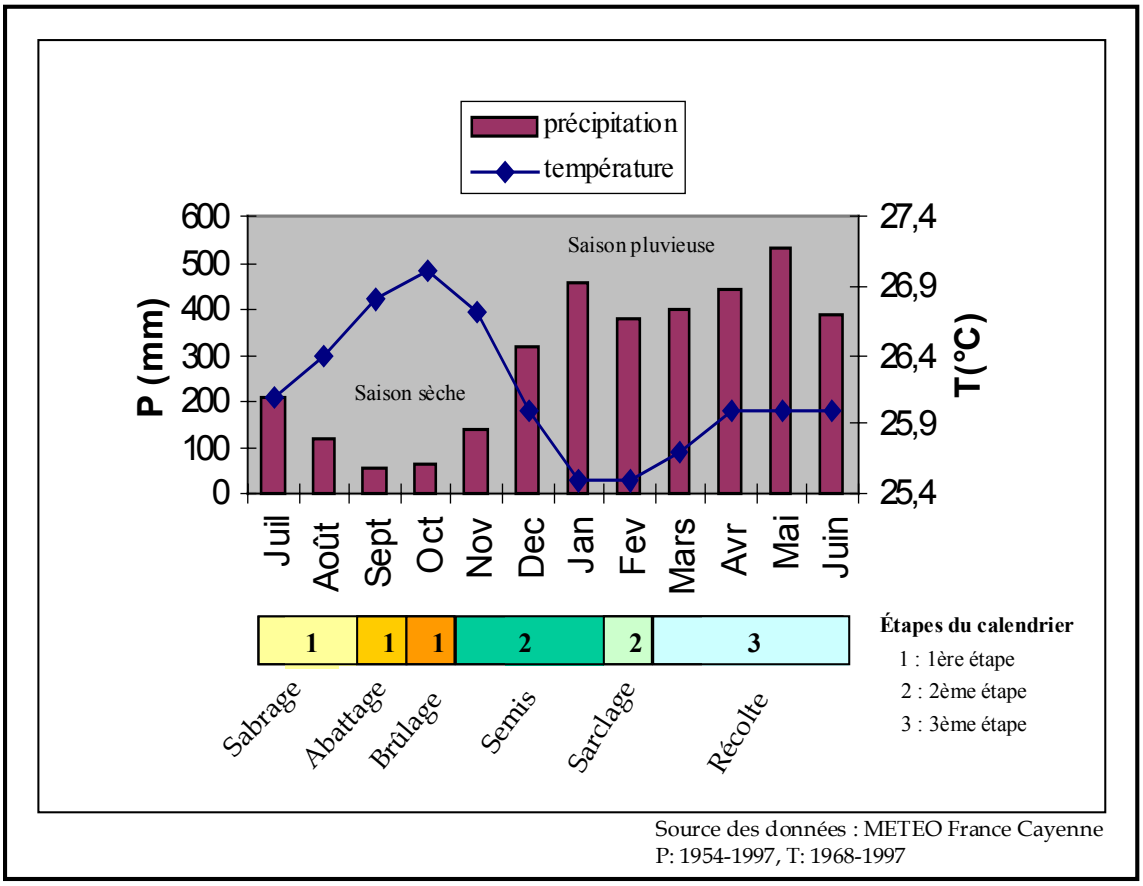


Figure 7. Calendrier annuel des opérations d'abattis à Saint-Georges de l'Oyapock

La période des récoltes constitue la dernière étape du cycle agricole. Elle commence en mars et s'étend jusqu'en juin. Durant cette période, la parcelle d'abattis présente un aspect quelconque, avec des plages de sol nu entourées de reliques de cultures et de végétation broussailleuse. Il s'agit d'adventices qui poussent spontanément dans les abattis laissés en jachère. Cette dernière intervient après deux ou trois ans d'exploitation, quand le sol, devenu peu fertile, ne permet plus une bonne productivité. Dès qu'on commence à récolter les produits du premier abattis, la prospection et l'ouverture d'un autre suivent. C'est ce dernier qui est appelé à prendre le relais lorsque l'abattis précédent sera laissé en jachère. Au cours de celle-ci, les états de surface passent successivement du stade de friche herbeuse puis arbustive, au stade de forêt secondaire puis dense (planche 3c).

a.première étape et premiers états de surface : les défrichements viennent d'être réalisés; le sol est quasiment nu.

b.deuxième étape : le semis a eu lieu et les cultures recouvrent progressivement la surface du sol.
De la gauche vers la droite : patate, manioc et maïs en première année de croissance.

c.dernière étape du cycle : les abattis sont laissés en jachère après la récolte de la production; les parcelles sont reconquises par une végétation herbeuse puis arbustive et arborée.

Clichés : Moïse Tsayem, sept. 2001 (photo 1), mai 1998 (photos 2, 5 et 8), avril 2000 (photos 3 et 6), avril 2002 (photo 4), août 2001 (photo 9) ; Laurent Polidori, mai 2002 (photo 7)

Planche photographique 3. Étapes de mise en place des abattis et états de surface correspondants

N.B. La lecture peut se faire tant horizontalement que verticalement selon le sens de la flèche.

II.1.3. Tailles et formes des abattis

La surface moyenne d'un abattis excède rarement 1 ha comme le montrent les mesures effectuées à l'aide d'un topofil et d'une boussole dans plusieurs localités de la Guyane (tabl. 16). Il s'agit donc de parcelles de très petites dimensions. Elles varient cependant d'une communauté à l'autre : de 0,81 ha chez les *Boni* du Bas Maroni à 0,33 ha chez les *Galibi* de Mana. Précisons qu'il s'agit d'abattis traditionnels dont la production est destinée en priorité à l'autoconsommation, car lorsque la finalité de cette production est commerciale, la surface moyenne cultivée peut atteindre 5 ha[3]. De forme géométrique quelconque, mais avec une dominante polygonale (fig. 8), les abattis s'enchevêtrent dans la forêt et contribuent au morcellement du paysage forestier.

Tableau 16. Surfaces moyennes de l'abattis dans quelques communautés de la Guyane française

Communautés/ localités	Surface moyenne (ha/an/ménage)	Sources des calculs
Boni, Bas Maroni	0,81	Hurault, 1965
Galibi, Mana	0,33	Hurault, 1972
Palikur, St-Georges	0,39	Tsayem, 1998
Wayana, Haut Maroni	0,42	Hurault, 1965
Wayâpi, Trois Sauts	0,51	Grenand, P., 1981

Au total, les modalités de mise en place et les caractéristiques spatiales des abattis suggèrent qu'il s'agit d'une forme d'occupation agricole qui consomme peu d'espace. La déforestation qu'elle induit est temporaire, car l'itinérance permet la repousse de la forêt pendant les périodes de jachère. Quelles sont les communautés qui mettent cette pratique agricole en œuvre en Guyane française ? Dans quel contexte démographique le font-elles ?

[3] d'après les enquêtes du service statistique de la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts de Cayenne

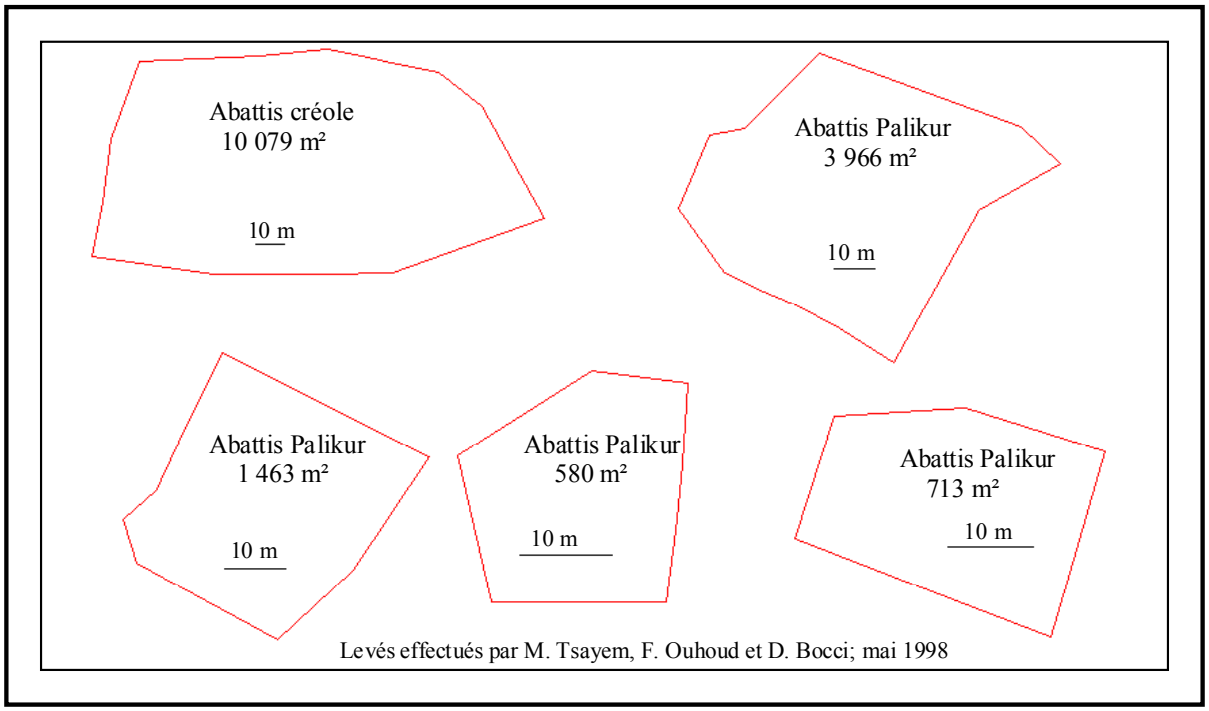


Figure 8. Formes et tailles de quelques abattis de la région de Saint-Georges

II.2. Les communautés humaines de Guyane et la pratique des abattis

La présentation des groupes de population qui vivent en Guyane française a pour objectif de rechercher et décrire les facteurs socio-économiques qui expliquent le poids des abattis et son évolution dans l'agriculture guyanaise. Nous traiterons de la croissance démographique et de la répartition de la population sur le territoire. Pour ce faire, nous exploiterons les données statistiques des recensements démographiques de l'Institut National de la Statistique et d'Etudes Economiques (INSEE). Malgré leurs imperfections[4], ces données fournissent une base d'analyse et d'appréciation du poids potentiel ou réel de l'Homme sur le milieu. A travers cette présentation, nous situerons le cadre géographique dans lequel les défrichements agricoles s'opèrent, ce qui nous permettra d'identifier les sites pertinents pour une caractérisation par télédétection.

[4] Les résultats des recensements de la population sont souvent décriés en Guyane française. Du fait des difficultés liées à la localisation et au dénombrement de la population, la réalité est soit sous-estimée, soit surestimée. Par ailleurs, la fluidité des frontières favorise une immigration clandestine difficile à chiffrer avec précision (Piantoni, 2002).

II.2.1. L'installation des communautés humaines sur le territoire

Il est établi que le groupe amérindien vit en Guyane française, et d'une manière générale dans toute l'Amazonie, depuis environ 4000 ans (Grenand P. et F.,1997). Cette communauté aurait commencé à pratiquer l'agriculture itinérante sur brûlis il y a maintenant 3000 ans. Les défrichements étaient effectués sur l'ensemble du territoire, car les Amérindiens utilisaient le réseau hydrographique pour se déplacer. Ce réseau quadrille très bien la Guyane et la dessert dans sa totalité (fig. 9). D'après Tardy (cité par Grenand P., 1998), le système d'abattis a été pratiqué au moins une fois sur environ 80 % de la Guyane française durant le Quaternaire récent.

La décroissance démographique consécutive à la conquête coloniale a fait passer le nombre d'Amérindiens de Guyane française d'environ 30 000 au début du 17ème siècle à près de 5000 de nos jours (Grenand P. et F., 1990). Ils sont installés aussi bien sur le littoral (*Galibi*, *Palikur*, *Arawak*) que dans la zone forestière intérieure (*Wayapi*, *Wayana*, *Emerillon*). Après l'arrivée des Européens[5] sur la côte vers 1650, le peuplement de la Guyane française s'est enrichi non seulement de la population créole, mais aussi de plusieurs communautés qui impriment leurs marques sur le milieu à travers l'utilisation agricole qu'elles font du sol. Il s'agit principalement des groupes suivants :

1. Les *Noirs Réfugiés* ou *Noirs Marrons* : *Djuka*, *Paramaka*, *Boni*, *Saramaka*. Ce sont les descendants d'anciens esclaves fugitifs de l'ex-Guyane hollandaise (actuel Surinam) établis le long du fleuve *Maroni* depuis le 18ème siècle. En 1986, suite au déclenchement de la guerre civile au Surinam, plusieurs milliers de *Noirs Marrons* se sont réfugiés dans le Nord-Ouest de la Guyane française.
2. Les *Hmongs,* installés depuis 1977 à *Cacao*, et depuis 1979 à Javouhey. D'autres installations *Hmongs* ont eu lieu récemment à Régina, Saül et Iracoubo.

[5] Généralement désignés par l'expression '*Métros*', diminutif de métropolitains

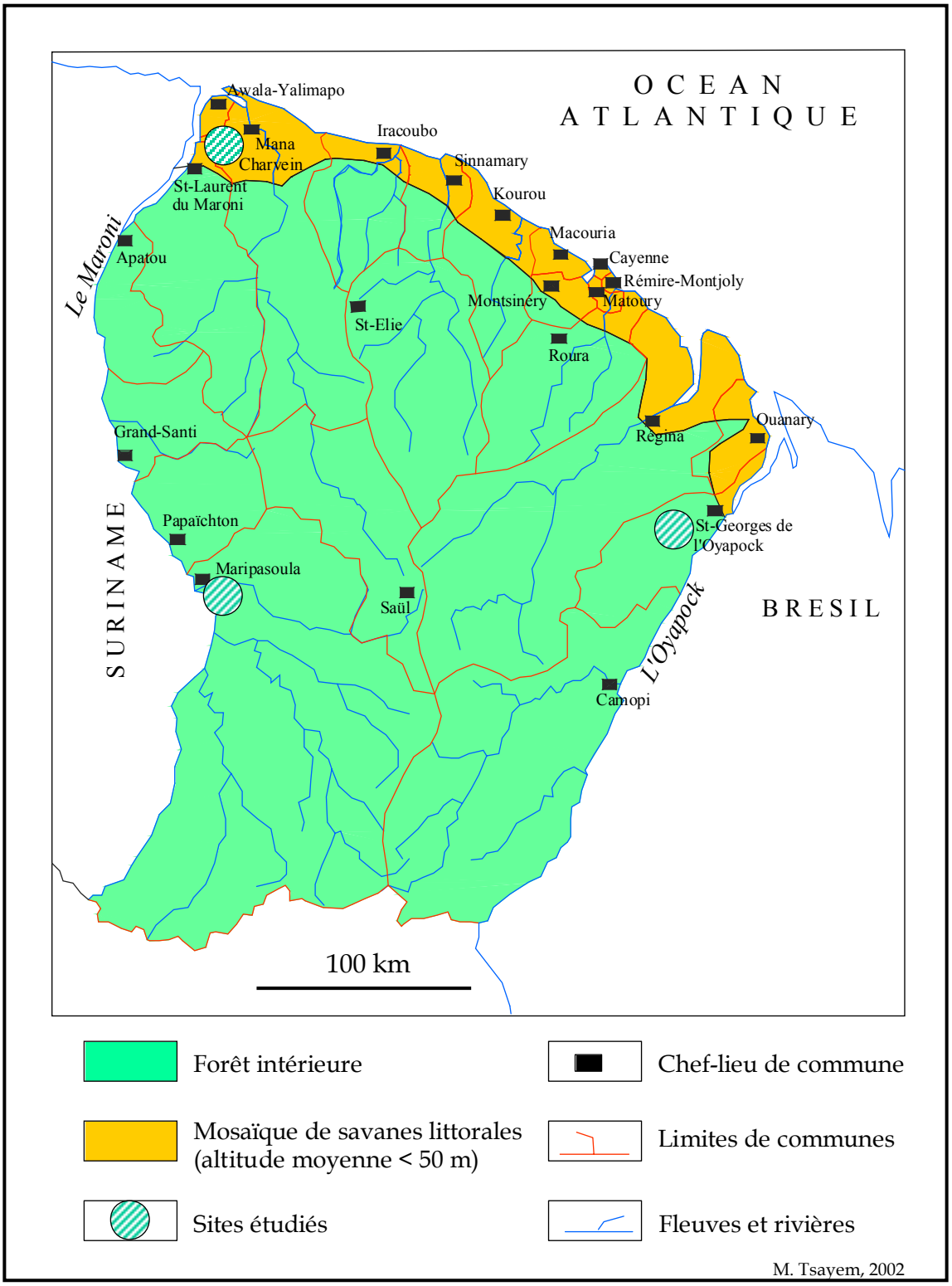


Figure 9. La Guyane française : localisation des sites étudiés

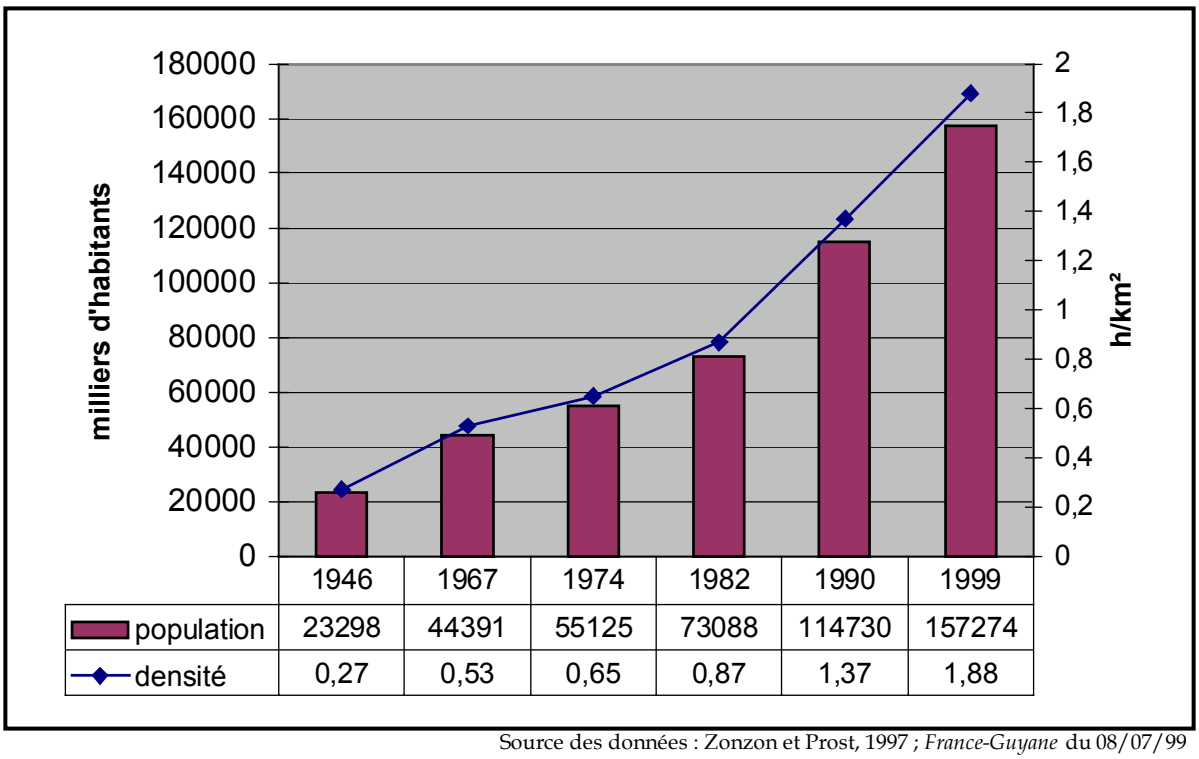
A ces groupes s'ajoutent les Haïtiens et les Brésiliens dont l'arrivée en Guyane est récente et se poursuit. De la sorte, la population est en constante augmentation surtout dans les agglomérations du littoral.

II.2.2. Les disparités de peuplement entre les savanes littorales et les forêts intérieures

La Guyane française est souvent qualifiée de désert humain ou « enfer vert » en raison de son faible peuplement. Cependant, depuis une cinquantaine d'années, on y assiste à une forte croissance démographique. De 1946 à 1999, le nombre d'habitants est passé de 23 000 à 157 000, soit quasiment une multiplication par 7 en 53 ans (fig. 10). Cette forte croissance démographique a été particulièrement remarquable entre 1982 et 1990, le nombre d'habitants étant passé de 73000 à 114000, soit une croissance annuelle de 5,8 %. Entre 1990 et 1999, ce taux annuel a connu une inflexion qui l'a ramené à 3,7 % (tabl. 17, p. 85).

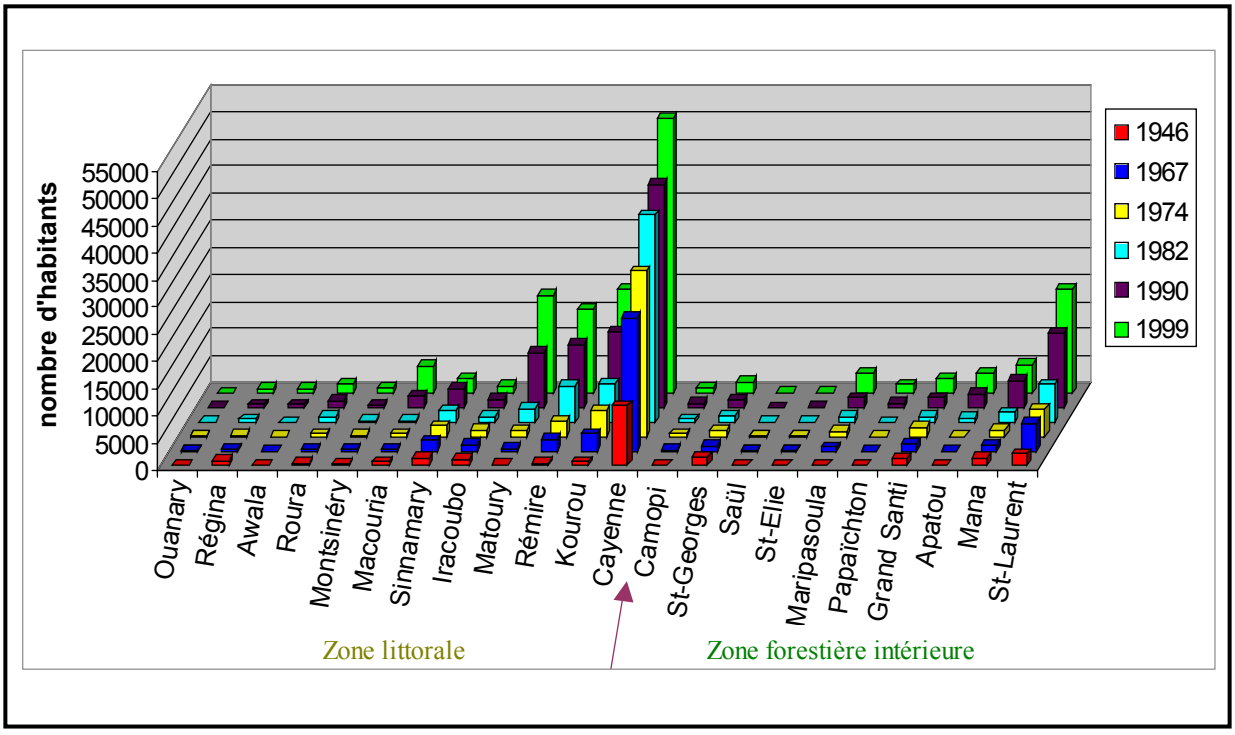
Ce sont surtout les communes situées sur la bande côtière qui ont vu leur population augmenter très significativement, du moins jusqu'en 1990. C'est en particulier le cas des communes de Cayenne, Rémire-Montjoly et Matoury (communes de la presqu'île de Cayenne) qui comptent actuellement près de 54 % de la population totale de la Guyane, sur moins de 3 % du territoire (tabl. 17 ; fig. 9 et 11). La population de Matoury est passée de 2532 à 10150 personnes entre 1982 et 1990, atténuant quelque peu l'engorgement de Cayenne. Tonate-Macouria, Kourou, Mana et Saint-Laurent ont connu une évolution similaire. Au total, la bande littorale rassemble environ 70 % de la population de la Guyane, dans des communes de faibles superficies, à l'instar de Cayenne qui a une surface de 23,6 km² et abrite pourtant à peu près le tiers de la population totale du Département.

Depuis 1990, les communes de la zone forestière intérieure enregistrent une forte croissance démographique, même si, en valeur absolue, elle n'est pas très significative. La population de Papaïchton est passée de 740 habitants en 1990 à 1645



Source des données : Zonzon et Prost, 1997 ; *France-Guyane* du 08/07/99

Figure 10. Accroissement de la population et des densités démographiques en Guyane française de 1946 à 1999



Source des données : Zonzon et Prost, 1997 ; *France-Guyane* du 08/07/99

Figure 11. Croissance démographique à l'échelle des communes de la Guyane française : la dissymétrie zone littorale/zone intérieure

en 1999, soit du simple au double, comme à Maripasoula où on a dénombré 3699 personnes en 1999, contre 1760 en 1990.

Les densités démographiques donnent de la Guyane française l'image d'une région sous peuplée en dépit de l'accroissement observé ces dernières décennies. A l'échelle du Département, on compte près de deux habitants au km². Il est vrai que cette densité a évolué parallèlement à la croissance démographique relevée depuis 1946 (fig. 10 et tabl. 17). On est ainsi passé d'une moyenne départementale de 0,27 habitant au km² en 1946 à 1,37 en 1990 et 1,88 en 1999. A titre de comparaison, le Surinam et le Brésil, pays voisins de la Guyane française, ont des densités moyennes respectives de 4 et 17 habitants au km².

Que ce soit à l'échelle des communes ou de l'ensemble du territoire, les densités de population ont très peu de signification réelle. Cependant, les chiffres illustrent la faible pression humaine sur le milieu. Celle-ci est variable, car les communes de la zone littorale présentent les plus fortes densités tandis que celles de la zone forestière intérieure, pourtant plus étendues, sont habitées par des populations numériquement très faibles. Ainsi, la commune de Maripasoula, la plus grande de Guyane (et de toute la France), compte actuellement près de 3700 habitants sur 18360 km², soit une densité de 0,2 habitant au km².

En réalité, dans les communes, la population est généralement concentrée soit dans les villes (pour la zone littorale), soit dans les bourgs à partir desquels elle organise l'occupation et l'utilisation du sol. Ce sont les seuls lieux où les densités sont élevées et l'utilisation du sol intense. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ces lieux de concentration humaine, les densités diminuent très fortement et deviennent nulles au-delà d'une certaine distance (une demi douzaine de kilomètre pour les bourgs de la zone forestière intérieure). « Surpeuplement » local et sous peuplement global, tel est le reflet de la distribution dissymétrique actuelle du peuplement de la Guyane française. Dès lors, les dynamiques démographiques et leurs transcriptions spatiales

perceptibles au niveau local, ont du mal à transparaître au niveau du Département considéré globalement.

Tableau 17. Croissance démographique en Guyane française de 1946 à 1999[6]

Communes	1946	1967	1974	1982	1990	1999	Evolution 1990-1999 (%/an)
Ouanary	0	157	121	89	80	92	1,2
Régina	856	430	366	499	530	766	4,5
Awala	0	0	0	0	630	884	4,8
Roura	437	393	401	943	1300	1779	3,5
Montsinéry	274	333	377	393	500	1036	10,7
Macouria	597	384	490	446	2100	5040	14,3
Sinnamary	1373	1913	2055	1991	3450	2784	- 1,8
Iracoubo	1109	1195	1239	938	1600	1422	- 0,9
Matoury	229	567	1133	2532	10150	18056	7,7
Rémire	539	2062	2950	6779	11700	15581	3,3
Kourou	582	3117	4720	7061	13900	19140	3,8
Cayenne	10961	24518	30461	38091	41060	50699	2,3
Camopi	82	276	399	554	750	1032	3,8
St-Georges	1502	817	1044	1199	1500	2088	3,7
Saül	0	90	119	67	60	155	14,6
St-Elie	0	107	136	138	120	239	9,4
Maripasoula	0	636	884	1007	1760	3699	11,1
Papaïchton	0	0	0	0	740	1645	11,9
Grand Santi	1219	1325	1904	1051	1750	2853	5,9
Apatou	0	0	0	618	2500	3630	4,8
Mana	1443	1040	1271	1721	4950	5443	1,01
St-Laurent	2095	5031	5055	6971	13600	19211	4,1
Totale	**23298**	**44391**	**55125**	**73088**	**114730**	**157274**	**3,7**

Sources : Zonzon et Prost, 1997 ; *France-Guyane*, n° 3731 du 08/07/99

[6] La valeur nulle de la population de certaines communes à certaines dates, s'explique par le fait qu'à ces dates, soit ces communes n'étaient pas encore créées, soit on ne disposait pas de statistiques spécifiques à elles. Ainsi, en 1946, le chiffre de 1502 habitants pour la commune de Saint-Georges est en fait commun à Saint-Georges et à Ouanary. C'est aussi le cas de Mana et Awala-Yalimapo jusqu'en 1982. Pour les communes dites du Maroni, le chiffre de 1219 habitants attribué à Grand Santi en 1946 est commun aux communes actuelles de Grand Santi, Papaïchton, Apatou et Maripasoula. C'est à partir de 1967 qu'on dispose des données de Maripasoula en tant qu' entité communale en soi. Dès lors, les chiffres de Grand-Santi n'incluent que Papaïchton et Apatou, ce jusqu'en 1976 pour Apatou qui devient une commune à part entière cette année là. Enfin, depuis 1990, on dispose des données spécifiques de Papaïchton qui est devenue à son tour une commune distincte de celle de Grand-Santi. Au total, la Guyane compte actuellement 22 communes.

Au-delà de la classique dissymétrie entre la zone de savanes littorales et la zone forestière intérieure, une lecture plus dégrossie de l'occupation du territoire guyanais amène à distinguer trois principaux pôles d'anthropisation : le Nord, l'Est et l'Ouest. Chaque pôle est marqué par des villes ou des bourgs qui exercent une attraction migratoire relativement importante. Le pôle Nord s'organise autour des agglomérations de la bande littorale, tandis que le pôle Est s'étend le long du fleuve Oyapock et est polarisé par le bourg de Saint-Georges. Quant au pôle Ouest, il occupe la rive guyanaise du fleuve Maroni, à l'ombre de la ville de Saint-Laurent et du bourg de Maripasoula. Cette lecture tripolaire isole la plus grande partie du territoire ; la zone méridionale où le bourg de Saül apparaît comme la seule empreinte anthropique dans l'immense étendue de forêt dense (fig. 9, p. 81).

En somme, la Guyane française est habitée par une mosaïque humaine diversifiée, en augmentation croissante et répartie inégalement sur l'ensemble du territoire. Cette organisation du territoire a orienté le choix des sites sur lesquels nous avons effectué des relevés de terrain indispensables pour caractériser les configurations télédétectées des abattis. Il s'agit de Charvein, Saint-Georges de l'Oyapock et Maripasoula. En raison de leurs situations socio-culturelle et démographique respectives, ces sites sont représentatifs de la diversité géographique de la Guyane française (fig. 9).

II.2.3. Les abattis des sites étudiés

Sur les trois sites retenus sont établies des communautés qui pratiquent l'agriculture itinérante sur brûlis de manière variée, ce qui permet de faire des comparaisons et de tenter des extrapolations à l'échelle de l'ensemble du territoire guyanais.

II.2.3.1. Les abattis *Djuka* de Charvein

A Charvein, au Nord-Ouest de la Guyane, on dénombre actuellement près de 200 familles rassemblant environ 1000 personnes de l'ethnie *Djuka*. Elles sont installées de part et d'autre des chemins départementaux 9 et 10. Arrivées du

Surinam à la suite de la guerre civile de 1986, ces personnes ont reçu le statut de PPDS (Populations Provisoirement Déplacées du Surinam). Mais à l'issue du règlement du conflit en 1991, elles n'ont pas souhaité retourner au bercail. L'agriculture traditionnelle est pour elles un moyen de subsistance et d'insertion territoriale. Bien que mis en œuvre selon le processus classique de défriche-brûlis, les abattis de cette communauté sont plus diversifiés, tant en ce qui concerne les techniques de semis que les types de cultures. La taille moyenne des parcelles défrichées est d'environ 0,8 ha, alors que dans les autres communautés de la Guyane, elle est généralement proche de 0,5 ha. Cette différence s'explique par le nombre relativement élevé d'enfants par famille *Djuka*, et par le souci de commercialiser une partie de la production agricole.

Les parcelles de maïs côtoient celles de patates douces, de bananiers, d'ignames et de manioc (planche 4). Parfois, le maïs est semé sur la même parcelle que la patate douce, le manioc et le bananier. Il existe par ailleurs de nombreux jardins familiaux et plusieurs vergers. Les jardins contiennent les palmiers, tandis que les vergers sont constitués essentiellement de citronniers. Les défrichements sont contenus dans un rayon de 2 km autour des routes, suite à l'accord de l'administration guyanaise qui a tacitement autorisé les ex-PPDS à défricher uniquement ce pourtour pour l'agriculture de subsistance.

II.2.3.2. Les abattis *Aluku* de Maripasoula

La commune de Maripasoula, au Sud-Ouest de la Guyane, compte 3710 habitants agglomérés essentiellement dans le bourg. Cette population est constituée majoritairement du groupe *Noir Marron Aluku*, venu du Suriname et établi du coté français depuis le début du 19ème siècle (Orru, 2001). La communauté amérindienne, la plus ancienne de la région, est composée des *Wayana* et des *Emerillon* vivant dans les villages situés en dehors du bourg (Twenké, Taluene, Kayodé, etc.). Nous nous sommes intéressés aux abattis du groupe *Aluku* en raison de la supériorité numérique de cette ethnie. Ces abattis occupent généralement la partie convexe des interfluves, et portent principalement du manioc (planche 5).

a. Abattis-mosaïque : juxtaposition des parcelles de patates (1er plan), de maïs (à droite) et de friche herbeuse (à gauche)

b : Parcelle de patates douces intercalées entre les troncs d'arbres

Clichés : Moïse Tsayem, avril 2000

Planche photographique 4. Aperçu des abattis *Djuka* de la région de Charvein

a. Manioc en deuxième année de croissance.
Les feuilles forment une voûte concave qui recouvre la surface du sol.

b. Parcelle défrichée mais non encore mise en culture (1er plan); manioc en deuxième année de croissance (deuxième plan).

Clichés : Moïse Tsayem, septembre 2001

Planche 5. Aperçu des abattis *Aluku* de la région de Maripasoula

Les défrichements sont de plus en plus effectués à la périphérie du bourg, notamment le long des pistes conduisant à Papaïchton, Yaou, Wacapou, Sophie, Abdalah et Machine, suite à l'extension de l'habitat consécutive à la croissance démographique.

On note chez les *Aluku* une tendance à la commercialisation de l'excédent de la production, ce qui incite à augmenter la superficie des parcelles défrichées. Par ailleurs, la pratique de l'abattis tend à s'accompagner d'une exploitation forestière plus ou moins illicite, favorisée par la généralisation de la tronçonneuse. Le bois prélevé est revendu souvent sous forme de meubles. Le bourg de Maripasoula, desservi quotidiennement par avion à partir de Cayenne, devient un lieu d'échanges commerciaux croissants. Ils sont stimulés par la recrudescence de l'orpaillage qui contribue de manière significative à la déforestation et à la dégradation de l'environnement (Polidori et *al*, 2001 ; Orru, 1998).

II.2.3.3. Les abattis *Palikur* de Saint-Georges de l'Oyapock

Saint-Georges de l'Oyapock compte actuellement près de 2500 habitants sur une superficie totale de 2320 km². Cette population est installée essentiellement dans le bourg bâti sur la rive gauche du fleuve Oyapock. Elle est constituée de Créoles, de Palikur (Amérindiens), de Saramaka (Noirs Marrons), de Brésiliens, de Français venus de l'Hexagone (« Métros »), et enfin des étrangers d'origines diverses. Au-delà du bourg et de ses environs immédiats, la forêt dense s'étend à perte de vue, sans traces significatives d'occupation humaine. Cette situation est commune à l'ensemble de la Guyane française.

Le groupe *Palikur* dispose du plus grand nombre d'abattis à Saint-Georges. Le manioc est la principale plante cultivée (planche photo 6a). Mais il existe aussi d'autres formes d'occupation agricole du sol : vergers de citrons et pâturages (planche photo 6b).

a. Abattis de manioc en début de croissance (à gauche) et en fin de première année de culture (à droite)

b. Verger de citronniers (à gauche) et pâturage d'élevage bovin (à droite)

Clichés: Moïse Tsayem, mai 1998 (photos 1 et 3), août 2000 (photos 2 et 4).

Planche 6. Abattis et autres formes d'occupation agricole de la forêt dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock

Outre sa position charnière entre la Guyane française et le Brésil, des aménagements sont en cours ou envisagés dans la région de Saint-Georges. Il s'agit en particulier de la construction d'un pont sur l'Oyapock, et de la route nationale n°2 devant relier Saint-Georges à Cayenne.

Les exemples de Charvein, Maripasoula et Saint-Georges, montrent qu'en dépit de leurs caractéristiques générales (prédominance du manioc, proximité des bourgs, des pistes et des rivières, etc.), les abattis diffèrent quelque peu d'une localité à une autre. Cette différence relative porte aussi bien sur la surface élémentaire défrichée que sur les techniques de mise en œuvre et le choix des cultures. A l'échelle locale, ce type de défrichement paraît très restreint dans l'espace. Qu'en est-il à l'échelle de l'ensemble du territoire guyanais ?

II.3. Importance des abattis dans le paysage agricole de la Guyane française

A l'image de son territoire caractérisé par le binôme savanes littorales / forêt intérieure, les paysages agraires de la Guyane se répartissent en deux catégories : d'une part, les paysages d'agriculture dite moderne, résultant essentiellement de la riziculture et de l'élevage bovin, d'autre part les paysages d'abattis, résultant de la pratique de l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis.

L'agriculture moderne remonte au 18ème siècle. Jusqu'en 1848, les modèles agricoles européens sont expérimentés sur le littoral guyanais sous l'impulsion des structures de l'Etat. Constituée d'exploitations de surface bien plus importante que celle des abattis, cette forme d'agriculture s'est vue assignée deux principaux objectifs : approvisionner la Métropole en produits exotiques et, de plus en plus, satisfaire la demande locale en produits vivriers. Avec plus ou moins de bonheur, différents plans de développement agricole se sont succédés en Guyane. Le plus connu d'entre eux est sans doute le « plan vert » initié en 1975 avec pour objectif de créer 260 exploitations agricoles de 65 ha en moyenne pendant 10 ans, soit au total 1700 ha. C'est surtout l'élevage bovin, la riziculture et, dans une moindre mesure,

l'arboriculture fruitière, qui ont bénéficié de ce plan de développement agricole aux résultats très mitigés (Piantoni, 2002).

L'agriculture guyanaise connaît une évolution notable depuis la fin des années 1970, laquelle se traduit par l'augmentation des surfaces mises en culture. La surface agricole utilisée a triplé au cours de ces 20 dernières années, passant de 7314 ha en 1980 à 23176 ha en 2000[7] (tabl. 18). Durant la même période, la surface des abattis a été multipliée par 5, passant de 1869 ha en 1980 à 8453 ha en 2000. Les abattis représentent 36 % de la surface agricole utilisée en 2000, contre 25 % en 1980. Cette part paraît faible en raison du fait que les exploitations agricoles de type abattis, contrairement aux exploitations de type riziculture ou pâturage, sont de petites dimensions comme nous l'avons indiqué dans les pages précédentes. Toutefois, lorsqu'on prend comme indicateur le nombre d'exploitations agricoles, l'importance des abattis dans le paysage agricole guyanais s'avère considérable. Ainsi, d'après une récente enquête de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DAF), les abattis représentent 90 % des exploitations agricoles de la Guyane en 2000, contre 76 % en 1980 (tabl. 18 et 19 ; fig.12). Cette évolution est à mettre en relation avec la multiplication des exploitations dans le Nord-Ouest, suite à l'immigration enregistrée dans cette région durant ces dernières décennies (Piantoni, 2002).

L'évolution récente de l'agriculture guyanaise se traduit en outre par la diversification des paysages agraires. Au paysage d'abattis traditionnel qui cède place à divers types d'accrus forestiers, s'ajoutent désormais des paysages plus ou moins permanents d'agriculture maraîchère et fruitière (fig. 13). On assiste à la sédentarisation progressive de l'agriculture. Cette sédentarisation concerne non seulement l'agriculture dite moderne (pâturages, riziculture, vergers), mais aussi l'agriculture sur brûlis telle que pratiquée par exemple dans les villages des *Hmongs*

[7] Les chiffres cités dans ce paragraphe sont issus des recensements agricoles effectués par la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts (DAF) de Cayenne. Il convient de manier ces statistiques avec prudence, car elles émanent des déclarations (très souvent non vérifiées) des agriculteurs, ou de simples estimations des enquêteurs. La télédétection, encore largement sous utilisée dans ce type d'enquête en Guyane française, pourrait pourtant être d'un apport considérable comme le montre le cinquième chapitre de cette thèse.

Tableau 18. Evolution de la surface agricole utilisée (SAU) en Guyane française de 1980 à 2000

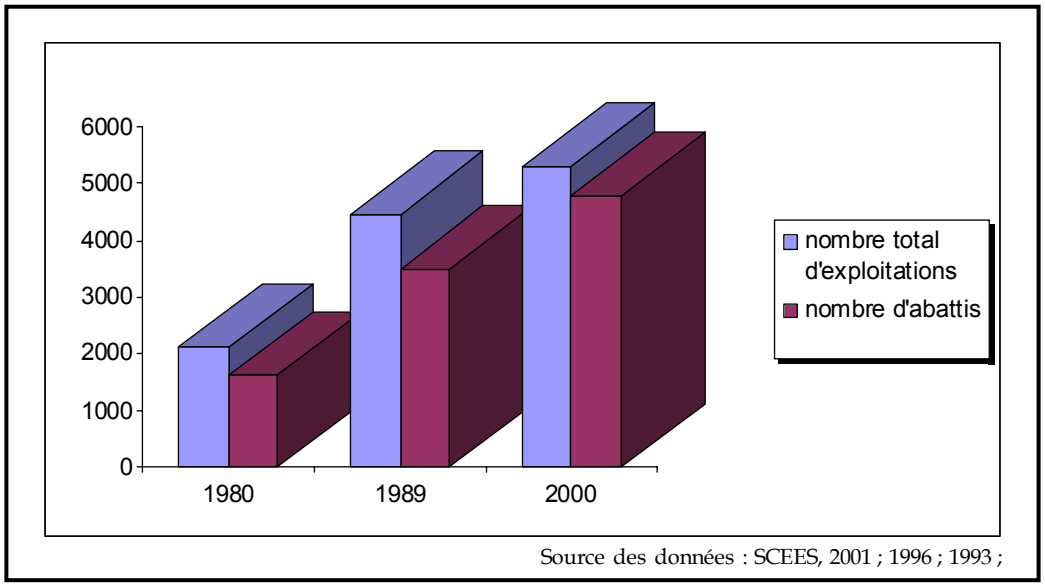
Années	S.A.U.(ha)	Nombre total d'exploitations	Dont abattis	
			nombre	surf. (ha)
1980	7314	2209	1600	1869
1989	20645	4491	3506	5593
2000	23176	5310	4792	8453

Sources : SCEES, 2001 ; 1996 ; 1993 et 1983

Tableau 19. Evolution de la part des abattis dans le paysage agricole guyanais entre 1980 et 2000

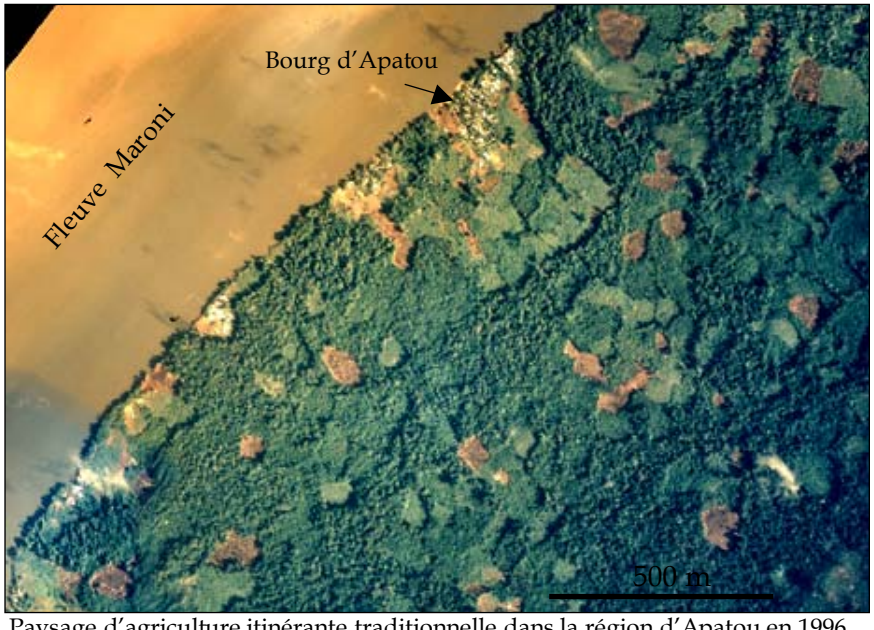
Années	% par rapport au nombre total d'exploitations	% par rapport à la SAU
1980	76	25
1989	78	27
2000	90	36

Sources : SCEES, 2001 ; 1996 ; 1993 et 1983



Sources : SCEES, 2001 ; 1996 ; 1993 et 1983

Figure 12. Evolution du nombre d'abattis par rapport au nombre total d'exploitations agricoles en Guyane française entre 1980 et 2000



Paysage d'agriculture itinérante traditionnelle dans la région d'Apatou en 1996. La grande dispersion des parcelles d'abattis (en couleur ocre) traduit l'itinérance et la précarité foncière. *Cliché SERG*

Paysage d'agriculture « moderne » dans la région de Risquetout en 1996. La rigueur géométrique du parcellaire est synonyme d'appropriation foncière et de sédentarité. *Cliché SERG*

Figure 13. De l'itinérance à la sédentarisation : diversification du paysage agraire en Guyane française

de Cacao, Javouhey et Régina. Il s'agit là d'une forme mixte d'agriculture, alliant pratique traditionnelle de défriche-brûlis et pratique moderne avec utilisation d'intrants et cultures permanentes. Cette mutation n'est pas sans poser des problèmes écologiques liés notamment à la pollution des sols et à l'abandon de la jachère. Dans ce contexte où prédomine la logique de la productivité pour la commercialisation, les défrichements sont définitifs et de ce fait, le retour à la forêt ne fait plus partie intégrante du système agriculture-environnement.

En dépit de cette évolution récente, l'agriculture traditionnelle itinérante demeure globalement bien inféodée à la forêt amazonienne de Guyane française, compte tenu du contexte démographique et des conditions socio-économiques modestes qui sous-tendent la pratique des abattis. De la sorte, il existe une grande différence d'ampleur entre la déforestation imputable aux abattis et celle provoquée par les défrichements de type front pionnier au Brésil (tabl. 20). D'après Bahuchet et *al*. (1994), la déforestation par l'agriculture traditionnelle itinérante concernerait des surfaces 20 à 50 fois moins importantes que celles détruites par les fronts pionniers amazoniens. Toutefois, bien qu'ils obéissent à des logiques différentes, ces deux modes d'utilisation de la forêt posent des problèmes sur le plan de la gestion de l'espace et de l'aménagement du territoire, notamment en raison de l'accroissement de la demande en terres et du caractère spontané et itinérant des défrichements.

Tableau 20. Récapitulatif comparé des caractéristiques des abattis et des fronts pionniers

L'abattis : une déforestation éphémère (grignotage de la forêt)	Le front pionnier : une déforestation quasi définitive
Une pratique agricole spontanée mais endogène et inféodée au milieu forestier	Une volonté politique de distribution des terres aux migrants (opérations agricoles planifiées)
Des défrichements de surfaces très modestes (0,3 à 2 ha)	Des défrichements de grande ampleur (100 à 10 000 ha)
Une mise en culture temporaire de la forêt (itinérance, jachère et reconquête forestière)	Une logique d'occupation permanente (prédominance de l'élevage extensif : pâturages)
Une pratique d'autosubsistance	Une finalité productiviste et commerciale

III. Problèmes d'aménagement posés par les défrichements agricoles amazoniens

Les fronts pionniers et les abattis posent des problèmes d'aménagement et de gestion foncière, car ils relèvent d'opérations tantôt planifiées, tantôt non planifiées. Généralement considérée en Guyane française comme le symptôme de l'occupation anachronique et anarchique de la forêt, la pratique des abattis s'effectue en marge de la légalité et pose le problème de consolidation de la propriété foncière. Quant aux fronts pionniers du Brésil, la rapidité de leur extension spatiale rend difficile le contrôle des défrichements. Cependant, la situation paraît moins préoccupante au Brésil du fait que l'accès à la terre est une composante forte des politiques d'aménagement du territoire comme en témoigne la création de l'Institut National de la Réforme et de la Colonisation Agraire (INCRA) chargé de la conception et de l'exécution des opérations publiques de distribution foncière. Rappelons également que depuis quelques décennies, l'Institut National d'Etudes Spatiales (INPE) évalue périodiquement l'étendue de la déforestation au Brésil en utilisant les images satellites. Il n'en va pas de même en Guyane française où les abattis font rarement l'objet de politiques concertées de planification et de gestion de l'espace, alors que le contexte foncier paraît précaire.

L'Etat est propriétaire de 90 % du patrimoine foncier de la Guyane (tabl. 21). Cette situation est paradoxale, car les propriétés privées représentent seulement 9 % de l'étendue du territoire contrairement à ce qu'on observe ailleurs, notamment en France métropolitaine où l'Etat ne détient qu'une infime partie du foncier. De la sorte, on évoque de plus en plus la « pénurie des terres » en Guyane, alors qu'on y compte seulement 160 000 habitants sur 85 000 km², soit à peu près 2 habitants au km² comme nous l'avons indiqué précédemment. La demande en terres est très forte et continue d'augmenter, en liaison avec l'accroissement démographique et l'immigration. La pression foncière se traduit par la multiplication des occupations sans titre (*squatterisation* du domaine public), ce qui confine la tenure des terres dans la précarité. Ainsi, 67 % du nombre d'exploitations agricoles ne sont pas

immatriculées au registre des domaines, soit 28 % de la surface agricole utilisée (tabl. 22). Trois mille demandes d'attributions foncières portant sur 49 700 ha ont été enregistrées et sont en cours d'instruction au Service des Domaines (tabl. 23). Une surface deux fois supérieure à celle qui est déjà en exploitation (23 176 ha cf. tabl. 18, p. 94) est donc convoitée, ce qui signifie que la surface agricole totale pourrait passer du simple au triple si toutes ces demandes sont acceptées.

Tableau 21. Répartition du foncier en Guyane française

Propriétaires	**Superficies**	
	(ha)	**%**
Etat	7 525 800	90,4
Particuliers	**784 093**	**9,4**
Département	10 355	0,15
Communes	4 206	0,05
Total	8 324 274	100

Source : adapté de GUYAMAZONE CONCEPTION (1993, in Taubira- Delannon ; 1998)

Tableau 22. Importance des occupations sans titre dans les modes d'exploitation agricole en Guyane française

Modes d'exploitation	**Nombre d'exploitation**	**%**	**Superficie (ha)**	**%**
Faire valoir direct	982	21	3520	17
Bail emphytéotique	578	12	11322	55
Occupation sans titre	**3099**	**67**	**5800**	**28**
Total	4659	100	20642	100

Source : adapté de GUYAMAZONE CONCEPTION (1993, in Taubira- Delannon ; 1998)

En Guyane, la législation foncière (code du domaine de l'Etat) prévoit deux principaux modes d'attribution gratuite des parcelles du domaine privé de l'Etat pour un usage agricole : la concession et le bail emphytéotique. La concession concerne les parcelles de 5 ha au maximum. Elle est accordée pour une durée de 5 ans aux particuliers qui en font la demande. Si la « mise en valeur agricole » effective

est constatée au bout de cette période de 5 ans, la parcelle peut être cédée à l'utilisateur qui acquiert de ce fait un droit de propriété. Quant au bail emphytéotique, il est accordé pour les exploitations agricoles de surface unitaire supérieure à 5 ha. Il confère le droit d'usage de la parcelle pour une période de 30 ans au terme de laquelle le terrain redevient la propriété de l'Etat.

Tableau 23. Demandes de baux et concessions enregistrées aux Services Fiscaux en Guyane (situation en 1999 d'après l'EPAG)

Communes	Nombre de dossiers	Baux (ha)	Concessions (ha)	Total (ha)
Awala	6	74	23	97
St-Laurent	354	4302	956	5258
Mana	305	10356	742	11098
Iracoubo	134	4175	332	4507
Sinnamary	171	2563	537	3100
Macouria	442	5276	1039	6315
Montsinéry	413	4253	974	5227
Cayenne	3	3	0	3
Remire	1	0	6	6
Matoury	322	694	830	1524
Roura	773	7242	2342	9584
Régina	44	269	992	1261
Apatou	1	0	5	5
Grand Santi	4	20	7	27
Maripasoula	6	162	6	168
St-Elie	4	23	5	28
Saül	32	107	100	207
St-Georges	43	1241	45	1286
Total	**3058**	**40760**	**8941**	**49701**

Pour ce qui est des communautés qui tirent traditionnellement leurs moyens de subsistance de la forêt, deux décrets ministériels de 1987 et 1992 leur reconnaissent le droit d'exploiter des parcelles dont l'étendue est définie par les pouvoirs publics en concertation avec ces communautés. Il s'agit en particulier des groupes Amérindiens et Noirs Marrons. Le droit qui leur est ainsi accordé collectivement ne concerne que l'usage des terres et non l'appropriation. Nos observations de terrain montrent que

cette nuance n'est pas bien comprise par tous, car dans certaines communautés, notamment chez les Noirs Marrons, on considère que lorsqu'une famille défriche une parcelle jamais cultivée auparavant, elle en détient une sorte de droit de propriété. En vertu de ce « droit », cette famille peut rétrocéder la parcelle à sa descendance, et aucune autre famille ne peut prétendre à la dite parcelle sans en référer à la première. C'est une sorte de droit coutumier qu'on retrouve dans la plupart des sociétés africaines. Ainsi se juxtaposent le droit coutumier et le droit régalien, ce qui en ajoute aux problèmes de gestion foncière au regard de l'augmentation actuelle des besoins en terres agricoles.

Par ailleurs, les autorités administratives accordent souvent un droit tacite à certaines populations pour qu'elles défrichent et cultivent les abattis à des fins de subsistance. Le cas des ex-PPDS installées à Charvein en est un exemple. Dans une telle situation, l'abattis devient une forme d'insertion territoriale permettant à une certaine catégorie de population d'afficher sa présence et de bénéficier éventuellement de la reconnaissance de l'Etat.

La spécificité du contexte foncier guyanais a conduit à la création en 1996 d'un organisme chargé de viabiliser et restructurer le domaine privé de l'Etat : l'EPAG (Etablissement Public d'Aménagement de la Guyane). Ses opérations d'aménagement ont débuté en avril 1998. Un volet important de ces opérations concerne la régularisation de la situation foncière des occupations illégales du domaine privé de l'Etat. L'ordonnance du 2 septembre 1998, complétée par deux décrets d'application du 11 mars 2000, définit les modalités de cette régularisation. Il est prévu de céder gratuitement 2500 m² à chaque agriculteur qui ne détient aucun droit de propriété et/ou d'usage sur la parcelle qu'il a défrichée avant le 4 septembre 1998. L'application de cette disposition n'est pas évidente, en raison de la difficulté de faire un inventaire précis de l'occupation du sol à cette date. Les travaux que nous avons effectués dans le cadre de cette thèse nous amènent à suggérer l'utilisation des données de télédétection, complétées par les enquêtes et les relevés de terrain pour

mieux traiter les problèmes d'aménagement liés aux défrichements agricoles en Guyane (Tsayem et *al*., 2002 et 2001).

Les paragraphes qui précèdent montrent que la gestion du foncier n'est pas aisée dans un contexte d'occupation agricole précaire. La tâche est d'autant plus complexe que les défrichements sont spontanés et itinérants, et ne font l'objet d'aucune planification. Dans ce cas, l'intervention des organismes d'aménagement du territoire se fait après coup pour tenter de restructurer l'espace. Il s'agit alors de réaménagement et non plus d'aménagement. En outre, des conflits d'usage peuvent surgir si les défrichements s'effectuent dans les espaces protégés ou classés (réserves et parcs, zones d'intérêt écologique, concessions forestières, etc.). C'est le cas au Brésil où les fronts pionniers s'étendent au-delà des limites prévues et empiètent sur les réserves foncières des populations autochtones. Il se pose alors le problème plus général de la gestion de l'environnement forestier amazonien et du suivi de l'occupation agricole du sol. Les enregistrements fournis par les satellites d'observation de la Terre peuvent sans doute permettre d'assurer ce suivi. Mais avec quelles images et quelles méthodes de traitement ?

CHAPITRE 4

METHODES DE CARACTERISATION ET DE SUIVI DES DEFRICHEMENTS AGRICOLES PAR TELEDETECTION

Le chapitre 3 a montré que les défrichements agricoles laissent des empreintes de dimensions variables dans la forêt amazonienne. A partir des relevés de terrain, nous allons décrire la taille, la forme et les états de surface des parcelles défrichées, car dans l'optique du suivi de la déforestation par télédétection, il est nécessaire de reconnaître ces caractéristiques sur les images satellites. Il s'agit alors de mettre en relation les critères spatiaux, spectraux et temporels (liés à l'observation de la Terre par les satellites) avec les dimensions au sol des défrichements et l'évolution des états de surface.

Aussi, l'objectif de ce chapitre est de présenter les méthodes mises en œuvre pour analyser les configurations télédétectées des fronts pionniers et des abattis. La détection de ces configurations dépend des spécificités des capteurs utilisés pour acquérir les images. C'est pourquoi nous justifions d'abord le choix des capteurs et des niveaux d'analyse, avant d'exposer les méthodes et techniques de caractérisation des défrichements agricoles d'une part, et de suivi de l'évolution de ces défrichements d'autre part.

I. Du choix des capteurs et des niveaux d'analyse

La détection dépend non seulement des caractéristiques spectrales et spatiales du capteur, mais aussi de celles des cibles observées. Cependant, plusieurs autres facteurs peuvent interférer et contribuer à augmenter ou à réduire la capacité de détection et de reconnaissance des objets géographiques. Ces facteurs ont trait à la sensibilité des détecteurs, aux conditions atmosphériques, au type de polarisation, à

la capacité de réflexion d'un objet par rapport à ses voisins, etc. Ces paramètres ne seront pas abordés ici, car notre travail se situe dans le sillage des préoccupations liées à l'utilisation des données de télédétection telles qu'elles sont mises à la disposition du public.

Les images que nous allons utiliser doivent être en mesure d'offrir alternativement une vision globale et détaillée de l'espace. La vision globale est nécessaire pour appréhender la structure générale et l'organisation d'ensemble au niveau régional[1], tandis que la vision détaillée est indispensable, d'une part pour accéder à l'agencement interne des structures spatiales, d'autre part pour détecter et caractériser localement les défrichements de faible étendue. Cette considération justifie l'approche multi-scalaire que nous avons adoptée dans cette partie de la recherche.

Suivant la nature des instruments et les procédés d'enregistrement, les données de télédétection disponibles pour cette étude peuvent être regroupées en trois domaines spectraux (tabl. 24) : le visible, l'infrarouge et les micro-ondes. Les photographies aériennes, qui appartiennent au domaine du visible et de l'infrarouge, sont présentées à part en raison de leurs spécificités : acquisition aéroportée en mode analogique.

Les enregistrements effectués dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge d'une part, et les micro-ondes d'autre part, présentent des résolutions spatiales qui vont du kilomètre au mètre, et des fauchées qui varient de 2700 km à 10 km. Ce sont ces paramètres intrinsèques qui vont présider au choix de nos images, en liaison avec les dimensions au sol des défrichements agricoles, et en accord avec les niveaux scalaires d'analyse (régional, sous-régional et local).

[1] régional est utilisé ici au sens de région amazonienne.

I.1. L'apport des enregistrements du visible et de l'infrarouge

En raison du large éventail d'acquisition des données dans ces domaines spectraux (de 0,4 à 15 µm), l'apport respectif des images varie suivant que leur résolution spatiale et/ou spectrale est faible, moyenne, haute ou très haute.

I.1.1. Les images à faible résolution spatiale

Cette gamme comprend les images NOAA AVHRR[2] et Spot 4 VEGETATION. Initialement conçu pour les applications océanographiques et météorologiques, l'Advanced Very Hight Resolution Radiometer (AVHRR) de la National Oceanic and Athmospheric Administration (NOAA) s'est par la suite avéré approprié au suivi du couvert végétal au niveau global, c'est à dire sur de très grandes étendues. Ce capteur enregistre le rayonnement électromagnétique réfléchi par les cibles dans des bandes de longueur d'onde assez larges (tabl. 24), comprenant le rouge (canal 1), le proche infrarouge (canal 2), l'infrarouge moyen (canal 3), ainsi que le rayonnement propre de ces cibles dans l'infrarouge thermique (canal 4 et 5). Les enregistrements effectués dans le proche infrarouge sont particulièrement utiles à l'étude de la végétation, tandis que ceux de l'infrarouge moyen et de l'infrarouge thermique sont nécessaires à la détection des feux de forêt d'une part, et de l'humidité des sols d'autre part. Les scènes NOAA AVHRR ont une résolution spatiale de 1100 m au nadir pour les formats Hight Resolution Picture Transmission (HRPT) et Local Area Coverage (LAC), et 4 à 8 km pour les formats Automatic Picture Transmission (APT) et Global Area Coverage (GAC). La fauchée au sol est de 2700 km, ce qui permet d'obtenir des images couvrant instantanément plusieurs pays, voire tout ou partie d'un continent. Au vu de ces caractéristiques spectrales et spatiales, et compte tenu de l'étendue considérable des défrichements de type front pionnier, on peut logiquement envisager de les observer sur les images NOAA AVHRR.

[2] Le LRT dispose d'une antenne qui permet la réception quotidienne de scènes NOAA couvrant le Nord de l'Amérique du Sud

Tableau 24. Panorama et caractéristiques générales des images utilisées

	Capteurs/ Instruments	Canaux et longueur d'onde (μm)	Résolution spatiale	Fauchées	Niveau scalaire d'observation	
Visible et infrarouge	**AVHRR de NOAA**	1: 0,58-0,68 2: 0,72-1,1 3: 3,55-3,95 4: 10,5-11,3 5: 11,5-12,5	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: 0,43-0,47 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75	1,1 km x 1,1 km	2250 km	Régional : région amazonienne (1/1 000 000 à 1/10 000 000)	
	MSS de Landsat	4: 0,45-0,6 5: 0,56-0,7 6: 0,67-0,8 7: 0,78-1,1	56 m x 79 m	185km	Sous-régional : NW Guyane (1/100 000 à 1/200 000)	2
	TM et ETM+ de Landsat	1: 0,45-0,52 2: 0,53-0,61 3: 0,62-0,69 4: 0,78-0,91 5: 1,57-1,78 6: 10,4-12,6 7: 2,10-2,35 P: 0,51-0,9	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	1: 0,50-0,59 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75 P: 0,51-0,73	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)	14 canaux: 0,44-0,86	4 m x 4 m	2 km	Local (1/10 000 à 1/1000	3
Radar	**SAR (ERS-1)**	C: 6 cm	26 x 30 m	100 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	4
	SAR (JERS-1)	L : 23 cm	18 m x 24 m;	75 km	Sous-régional et local (1/200 000 à 1/50 000)	
Photos aériennes	**Chambres photogra-phiques**	Visibles : 0,38-0,76	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.

Cette considération est aussi valable pour les images Spot 4 VEGETATION, car elles partagent des similitudes avec les images NOAA AVHRR, notamment la largeur du champ de vue (tabl. 24). Embarqué à bord des satellites Spot 4 et Spot 5 mis sur orbite respectivement en mars 1998 et en mai 2002, l'instrument VEGETATION acquiert les images de la surface de la Terre en enregistrant les réflectances dans les longueurs d'onde du bleu, du rouge, du proche et du moyen infrarouge. Dans le visible, ce capteur dispose d'une bande supplémentaire par rapport au capteur AVHRR, ce qui suggère une plus grande richesse des mesures effectuées dans ces bandes spectrales. Les scènes Spot 4 VEGETATION ont un segment de 2250 km au sol, et une résolution spatiale de 1150 m au nadir. Nous allons les utiliser en complément d'images NOAA AVHRR pour localiser les fronts pionniers et décrire leur structure au niveau régional.

I.1.2. Les images à moyenne et haute résolutions spatiales

Il s'agit essentiellement d'enregistrements des satellites Landsat et Spot (tabl. 24). Ces deux systèmes d'observation ont connu quelques évolutions récentes. L'innovation du système Landsat concerne les instruments embarqués à bord du satellite Landsat 7, dernier en date de la série. Opérationnel depuis 1999, il fournit des images acquises tant en mode multispectral (ETM+) qu'en mode panchromatique, alors que ses prédécesseurs n'effectuaient pas d'enregistrements en mode panchromatique. Les images du capteur MSS, le tout premier de la série Landsat, ont une résolution spatiale de 80 m. En mode multispectral, la résolution des images Landsat 7 est de 30 m (comme pour l'ensemble des données du système TM), tandis qu'en mode panchromatique, elle est de 15 m.

Quant au système Spot, l'évolution dont il est l'objet concerne les instruments embarqués à bord des satellites Spot 4 et Spot 5. Le capteur HRVIR de Spot 4 comporte un canal spectral en plus des trois canaux classiques des enregistrements antérieurs. Il s'agit du canal Moyen infrarouge (MIR : 1,58-1,75 µm). Spot 5 a à son bord les capteurs Haute Résolution Spatiale (HRS) et Haute Résolution Géométrique (HRG) qui ont des caractéristiques spatiales améliorées par rapport à celles des

précédents capteurs de la série Spot. Ainsi, en mode panchromatique, la résolution spatiale des images est passée de 10 à 5 m, et les traitements post acquisition permettent d'obtenir un pixel de 2,5 m (supermode). En mode multispectral, la résolution des images est passée de 20 à 10 m sauf dans la bande du Moyen Infrarouge.

Les enregistrements Spot et Landsat sont effectués dans les longueurs d'onde du visible (bleu, vert et rouge pour Landsat, vert et rouge pour Spot) et de l'infrarouge (proche, moyen et thermique pour Landsat, proche et moyen pour Spot). Ils permettent de reconnaître les empreintes anthropiques, de différencier le sol de la végétation, d'évaluer la teneur en eau, l'état de la végétation et des cultures, etc. Les dimensions des scènes couvrent 185 km de côté pour le système Landsat et 60 km pour Spot.

Ces caractéristiques indiquent que les capteurs Landsat et Spot conviennent aux observations de niveaux sous régional[3] et local, car ils fournissent des images qui présentent un compromis intéressant entre résolution spatiale et champ de vue au sol. De la sorte, sur les images Spot et Landsat qui couvrent des surfaces de 3600 et 34 000 km² respectivement, il est possible de détecter les objets géographiques de dimensions élémentaires relativement réduites (quelques dizaines de mètres de côté). Nous allons donc utiliser ces images pour localiser et décrire les zones d'abattis d'une part, et d'autre part pour appréhender les détails de l'organisation interne des fronts pionniers.

I.1.3. Les images à très haute résolution spectrale

Encore en développement, et en grande partie aéroporté, le domaine de la très haute résolution spectrale propose des images issues de l'enregistrement de l'énergie réfléchie dans une fourchette spectrale divisée en bandes étroites et resserrées. Par exemple, avec le spectroradiométre CASI (Compact Airborne

[3] Dans cette recherche, l'expression sous-régional désigne le niveau scalaire intermédiaire entre le régional et le local. Elle renvoi donc à une portion de région : Ouest de la Guyane, Nord du Para, etc.

Spectrographic Imager), des campagnes d'acquisition ont été effectuées en Guyane française en 1998 dans 14 bandes spectrales comprises entre 0,44 et 0,86 µm, fournissant des images multispectrales de 4 m de résolution spatiale. Le nombre élevé de bandes spectrales et la finesse de la résolution spatiale autorisent une plus grande discrimination des objets géographiques qui se trouvent dans le champ de vue. Mais l'amélioration de la résolution spatiale et spectrale se fait au détriment de la largeur du segment d'acquisition au sol, car la fauchée des images CASI n'est que de 2 km dans ce cas. Elles conviennent donc à l'observation à l'échelon local (fig. 14). Nous aurions pu utiliser ces images pour caractériser plus finement les abattis. Mais la campagne d'acquisition organisée par l'IRD en 1998 était focalisée sur la zone littorale de la Guyane française. Les régions forestières où se développent les abattis n'ont été couvertes que partiellement et occasionnellement. La figure 14 donne un aperçu du potentiel de ces images pour la détection des abattis. La très haute résolution spectrale et spatiale permet de distinguer aisément les abattis au sol nu de ceux qui portent déjà les cultures. De même, les friches herbeuses sont bien différenciées de la forêt secondaire et de la forêt dense.

Cette présentation montre que les images enregistrées dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge constituent une gamme de données très variée permettant de détecter et d'analyser les traces laissées par les défrichements agricoles dans la forêt amazonienne. Qu'en est-il des données acquises dans les micro-ondes ?

I.2. L'apport des images radar

Contrairement à la télédétection dans le visible et l'infrarouge, le système d'acquisition radar ne dépend pas de l'énergie provenant du Soleil. Une antenne d'émission et de réception envoie de l'énergie en direction de la cible et recueille la quantité rétro-diffusée. Ce système d'acquisition est dit actif. Les capteurs radar fonctionnent dans les hyperfréquences ou micro-ondes, tranche de longueurs d'onde dans laquelle l'atmosphère est quasiment transparente. Cette faculté permet d'éviter la perturbation du signal induite par la couverture nuageuse, ce qui justifie l'intérêt

Bâti et routes

Abattis au sol nu

Abattis portant des cultures

Friche herbeuse

Forêt secondaire

Forêt dense

Figure 14. Les défrichements agricoles vus par le capteur CASI au lieu-dit Marguerite (Composition colorée des canaux 9, 4 et 1 respectivement en rouge, vert et bleu, Nord- Ouest de la Guyane, image du 24/10/98, LRT)

potentiel de ces images pour l'observation de l'environnement dans les régions tropicales humides où la nébulosité est constamment forte.

Dans le cadre de cette étude, nous disposons d'images radar à synthèse d'ouverture acquises par les capteurs ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) et JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) sur la Guyane française, respectivement en bandes C (6 cm) et L (23 cm). Nous n'avons pas eu l'occasion d'utiliser les images radar aéroporté. Les données ERS ont une résolution spatiale de 30 m et une fauchée de 100 km. Quant aux images JERS, elles ont une résolution spatiale de 24 m et un segment de 75 km au sol. Nous allons examiner les potentialités de ces images en matière de détection des défrichements agricoles au niveau local, compte tenu de la surface des scènes (de 75 à 100 km de côté) et des résolutions spatiales (24 à 30 m). Ces caractéristiques sont proches de celles des photographies aériennes.

I.3. Les photographies aériennes et l'analyse des défrichements agricoles

Historiquement, les photos aériennes sont les premières données de télédétection utilisées pour établir les cartes topographiques et décrire l'organisation de l'occupation du sol. Elles ont généralement une très grande résolution spatiale et couvrent des surfaces relativement peu étendues. Cette grande résolution spatiale fait des photographies aériennes des documents adéquats pour une approche détaillée des objets géographiques sur un territoire. Nous allons les utiliser pour inventorier, quantifier et cartographier les parcelles d'abattis.

Au total, les images que nous avons choisies pour caractériser les défrichements agricoles amazoniens sont très variées. Cette variabilité va être mise en rapport avec les dimensions des parcelles défrichées. De la sorte, nous allons procéder à une analyse multi-scalaire, en relevant les complémentarités et les limites entre les différents systèmes d'acquisition d'images. Quelles méthodes et techniques allons-nous utiliser pour mettre en évidence les configurations télédétectées ?

II. Méthodes de caractérisation des défrichements agricoles par télédétection

Caractériser un objet géographique par télédétection suppose sa détection ou perception, son identification ou reconnaissance, et son analyse ou description. Comme nous l'avons vu dans la première section de ce chapitre, la détection dépend des caractéristiques spectrales et spatiales du capteur et de celles de l'objet d'étude. Quant à l'identification et à la description, elles nécessitent un ensemble de traitements destinés à améliorer la lisibilité du contenu des images. Pour ce faire, nous avons utilisé successivement l'approche analogique et l'approche numérique. Sans négliger l'approche numérique, nous accordons une grande importance a l'analyse visuelle, car dans le contexte tropical marqué par une occupation du sol souvent spontanée et en marge de la légalité, l'image peut servir de pièce à conviction. Pour améliorer l'interprétation visuelle et faciliter l'analyse numérique, nous avons appliqué des traitements préliminaires aux images. Ces traitements comprennent les corrections géométriques, le recalage géographique, le re-échantillonnage et l'amélioration du contraste.

II.2.1. L'approche analogique

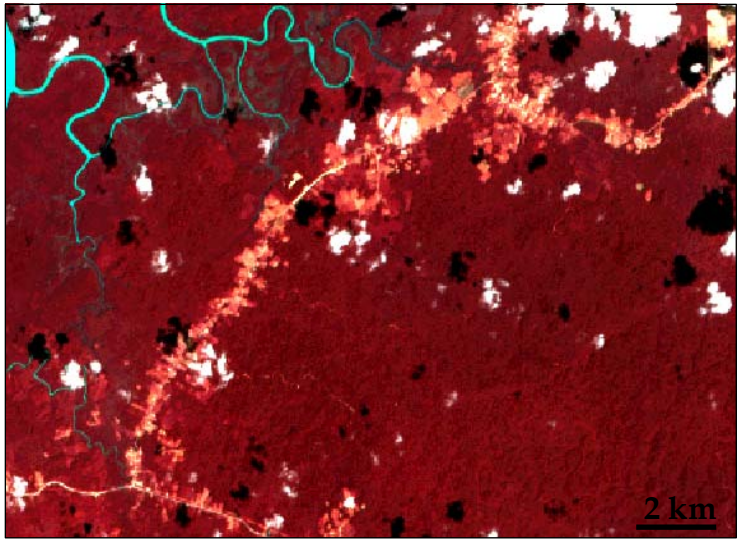
Elle consiste en une lecture directe de l'image selon les méthodes de photo-interprétation. Elle fait recours aux paramètres visuels comme la teinte, la forme et la taille des objets. Nous l'avons utilisée pour identifier les types d'occupation du sol aussi bien sur les canaux isolés que sur les combinaisons de plusieurs canaux ou compositions colorées, en nous aidant de nos relevés de terrain. Les compositions colorées offrent la possibilité de disposer d'une information enrichie de l'apport spécifique de chaque canal. Il s'agit alors de combiner trois canaux dans le but de constituer une image colorée synthétisant un maximum d'informations contrastées. Pour ce faire, une couleur primaire (bleu, vert ou rouge) est assignée à l'affichage du contenu de chaque canal suivant le modèle de représentation en synthèse additive trichrome RVB (rouge, vert, bleu). Avec les images Spot HRV par exemple, les compositions colorées classiques sont effectuées en attribuant la couleur bleue au canal 1 (vert), la couleur verte au canal 2 (rouge) et

la couleur rouge au canal 3 (proche infrarouge). On obtient ainsi une composition colorée dite en fausses couleurs. Depuis l'avènement de Spot 4 HRVIR, on dispose d'un canal supplémentaire : le moyen infrarouge. Le nombre de combinaisons possibles a donc augmenté, ce qui accroît aussi les possibilités d'identification du contenu thématique des images.

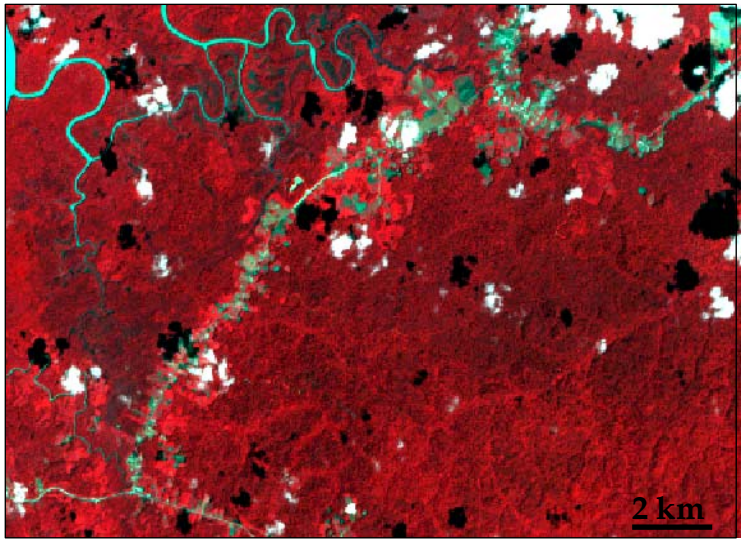
Les extraits de compositions colorées présentées dans la figure 15 illustrent notre propos. Nous avons réalisé plusieurs essais en permutant les canaux de l'image Spot 4 HRVIR du site de Charvein[4]. La combinaison R4, V3, B2, associant le canal 4 (moyen infrarouge) en rouge, le canal 3 (proche infrarouge) en vert, et le canal 2 (rouge) en bleu, offre le résultat le plus satisfaisant en terme de lisibilité. La différenciation visuelle des catégories d'occupation du sol et de leurs variantes est nette. Bien que le choix des couleurs d'affichage soit arbitraire, il permet d'avoir des indications sur les propriétés spectrales des types d'occupation du sol. Les enregistrements du proche infrarouge (canal 3) contribuent de manière significative à la discrimination des couverts végétaux. Les enregistrements du moyen infrarouge (canal 4) complètent ceux du canal 3 et confortent l'interprétation visuelle. Aussi, dans la suite du travail, nous utiliserons les compositions colorées associant, dans la mesure du possible, les enregistrements du moyen infrarouge, du proche infrarouge et du rouge, soit pour Spot 4, les canaux 4, 3 et 2 dans l'ordre RVB, et pour TM, les canaux 5, 4 et 3.

Appliqué à l'image Spot 4 de la région de Maripasoula acquise le 27 septembre 1998, ce type de composition colorée permet de reconnaître les empreintes anthropiques dans la forêt. Ainsi, les défrichements agricoles, les pistes et le bâti sont bien mis en évidence (fig. 16). Les abattis apparaissent en rose et s'étendent en « tache d'huile » dans un rayon de 300 m de part et d'autre des pistes.

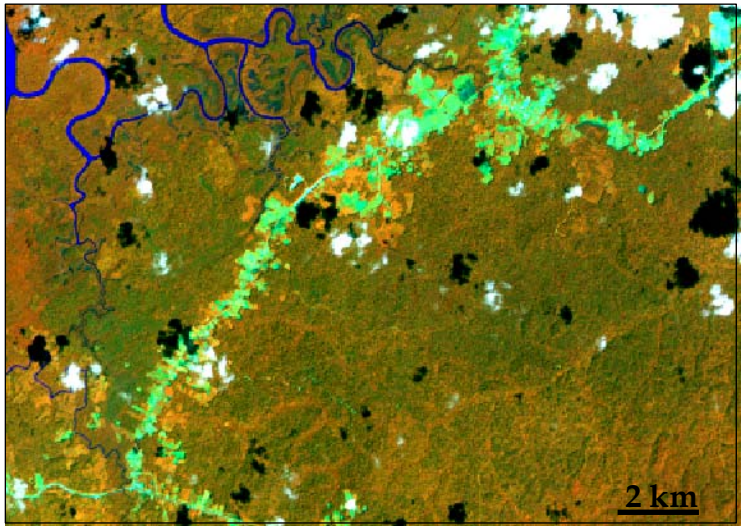
[4] L'enregistrement satellite a eu lieu le 26 novembre 1999, simultanément en modes panchromatique (avec une résolution spatiale de 10 m) et multispectral (avec une résolution spatiale de 20 m). La fusion des enregistrements effectués dans les deux modes donne une image multispectrale de 10 m de résolution.



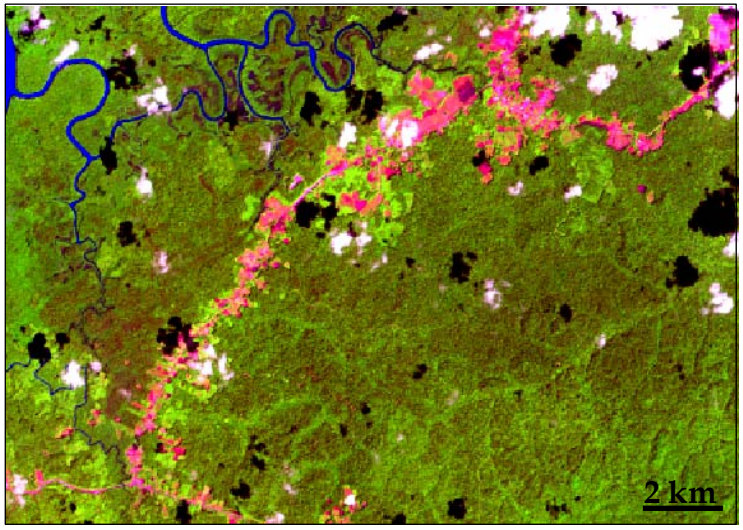
R4, V2, B1 : Canal 4 en rouge, canal 2 en vert, canal 1 en bleu



R3, V2, B1 : Canal 3 en rouge, canal 2 en vert, canal 1 en bleu



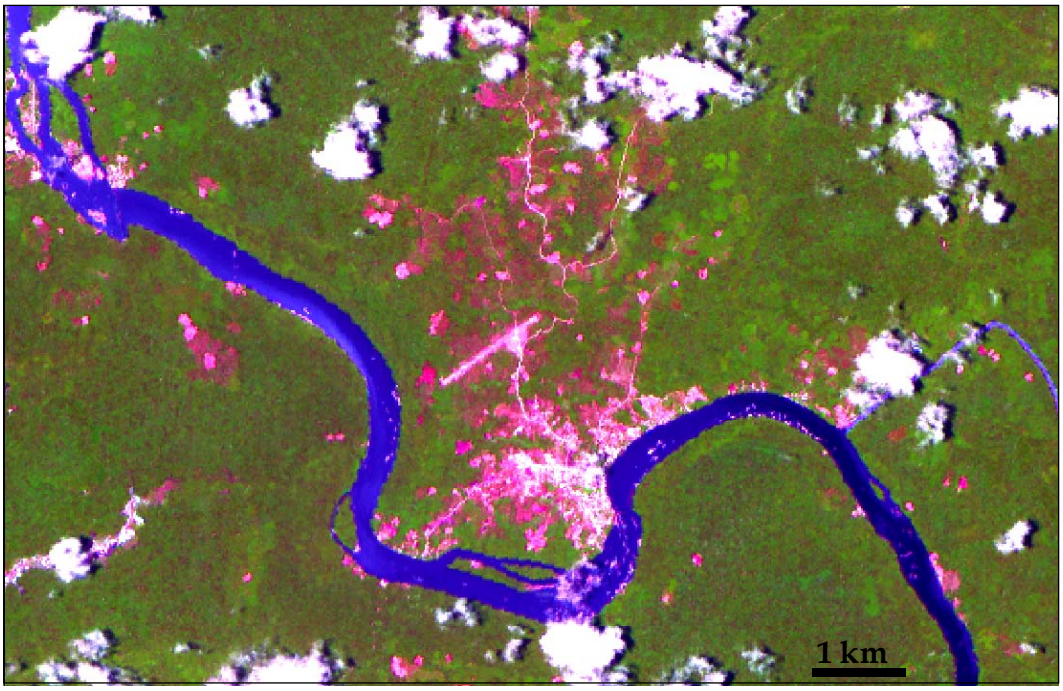
R3, V4, B2 : Canal 3 en rouge, canal 4 en vert, canal 2 en bleu



R4, V3, B2 : Canal 4 en rouge, canal 3 en vert, canal 2 en bleu

Extrait de l'image Spot 4 de la région de Charvein acquise le 26/11/99

Figure 15. Exemples de compositions colorées réalisées par permutation des canaux dans le plan RVB



En rose : les abattis, les pistes et les friches. En blanc : le bâti (à ne pas confondre avec les plages de nuages)
Composition colorée (R4, V3, B2) de l'image Spot 4 de la région de Maripasoula acquise le 27/09/98 (fusion P+xi).

Figure 16. Composition colorée mettant en évidence les empreintes anthropiques dans la région de Mariapsoula en 1998

Au niveau régional, l'approche analogique permet d'abord l'observation globale du territoire étudié, puis l'identification des défrichements de grande ampleur (fronts pionniers). Ce niveau est en quelque sorte l'équivalent des « zones d'égale apparence » que Hotyat et Veyret (1991) retiennent pour discriminer les unités spatiales homogènes. C'est aussi celui auquel Fotsing (1998) procède au découpage des paysages de l'Ouest du Cameroun en « systèmes observés régionaux » (SOR).

Au niveau sous-régional, les détails du niveau régional sont mis en évidence et l'analyse s'efforce de leur attribuer une signification thématique. C'est à ce niveau d'observation que nous avons établi la typologie des abattis. Les profils radiométriques aident à identifier les types de couvert, car ils permettent d'avoir les signatures spectrales qui caractérisent le contenu géographique des images. Au niveau local, la typologie des abattis est affinée et il est possible de décrire les parcelles considérées individuellement.

II.2.2. L'approche numérique

C'est une démarche qui complète la photo-interprétation et permet d'affiner l'analyse de l'espace. Il s'agit de générer des statistiques pour quantifier l'emprise spatiale de chaque catégorie d'occupation du sol (forêt, défrichements, cours d'eau, etc.). Nous l'avons appliquée aux niveaux sous-régional et local, sur les images Landsat et Spot d'une part, et sur les photographies aériennes d'autre part. Dans le premier cas, nous avons effectué des classifications supervisées (à l'aide du logiciel *Erdas Imagine 3.1*) sur la base des signatures spectrales de chaque type de surface. Mais les relevés de terrain sont indispensables pour attribuer une signification thématique réelle aux classes isolées à la suite des regroupements de pixels. Pour toutes les classifications supervisées, nous avons utilisé l'algorithme du maximum de vraisemblance qui regroupe les pixels en fonction de leurs probabilités d'appartenir aux classes définies au préalable. La définition de ces classes est basée sur les connaissances de terrain et se fait par saisie des parcelles d'entraînement sur une composition colorée. La classification est ensuite appliquée à l'ensemble des canaux de l'image. Les résultats sont restitués sous forme de spatiocartes sur lesquelles la texture des forêts est maintenue telle qu'elle est issue de la composition colorée. Cette option permet de resituer l'occupation du sol dans le contexte forestier amazonien en utilisant l'image comme support d'affichage de l'information spatialisée.

Le traitement numérique des photographies aériennes repose essentiellement sur l'utilisation d'un système d'information géographique (à l'aide du logiciel *AutoCad Map Release 2.1*) pour caractériser les abattis au niveau local. La taille des défrichements et l'étroitesse des espaces concernés font de la photographie aérienne un outil bien adapté à l'analyse des abattis. Ce volet de l'étude est illustré par les traitements appliqués aux photographies aériennes de la région de Saint-Georges de l'Oyapock prises en 1958, 1987 et 1997. A partir de ces photos, nous avons constitué un SIG en vue d'inventorier les abattis et mesurer leur emprise spatiale par rapport aux autres composantes de l'occupation du sol. La méthodologie mise en œuvre

comporte deux étapes principales[5] (fig. 17) : la phase image qui conduit à l'élaboration des mosaïques de photos aériennes, et la phase d'analyse spatiale (SIG) qui débouche sur la production de cartes et statistiques nécessaires à la caractérisation de l'occupation du sol et son évolution spatio-temporelle.

Toutes ces méthodes et techniques vont nous servir à localiser, reconnaître et décrire les défrichements agricoles amazoniens tels qu'ils apparaissent sur les images satellites et les photographies aériennes. Mais il s'agira d'une « description figée », car elle ne va pas rendre compte de l'évolution spatiale de ces défrichements. Pour mettre en évidence les changements d'occupation du sol et les dynamiques de défrichements agricoles, il est indispensable d'utiliser les images multidates qui offrent la possibilité de suivre les modifications qui surviennent dans la configuration spatiale des paysages. Le caractère synoptique et la répétitivité des acquisitions par télédétection permet de disposer d'une banque d'images qui se renouvellent sans cesse. Ainsi se développe la télédétection des changements qui s'appuie sur des méthodes variées pour décrire l'évolution temporelle des états de surface.

III. Méthodes de détection des changements dans l'environnement forestier

La télédétection des changements est un domaine de recherche qui connaît un essor croissant comme en témoigne l'abondante littérature qui lui est consacrée : Rogan et *al*., 2002 ; Carvalho et *al*., 2001 ; Hayes et Sader, 2001 ; Roy et Tomar, 2001 ; Sader et *al*., 2001 ; Woodcock et *al*., 2001 ; Franklin et *al*., 2000 ; Mas, 2000 et 1999 ; Imbernon, 1999b,c ; Fotsing, 1998 ; Lunetta et *al*., 1998 ; Pohl et *al*., 1998 ; Michener et Houhoulis, 1997 ; Coppin et Bauer, 1996 ; Massart et *al*., 1995 ; Selleron, 1995 ; Green et *al*., 1994 ; Sader et Winne, 1992 ; Hubschman et Selleron, 1991. La plupart de ces études abordent les régions tropicales où les mutations socio-spatiales sont parfois très rapides. Les paragraphes qui suivent ont pour ambition de faire le

[5] Pour plus de détails, voir la note méthodologique publiée dans la revue *Science et Changements Planétaires/Séchéresse* (Tsayem, 1999), ainsi que l'article publié dans les *Cahiers d'Outre Mer* (Tsayem et *al*., 2002).

point sur les approches couramment utilisées pour mettre en évidence et analyser les changements d'occupation du sol. Il s'agit de présenter un « état de l'art » dans le but de retenir les méthodes que nous allons ensuite appliquer pour analyser l'évolution spatio-temporelle des défrichements agricoles en Amazonie.

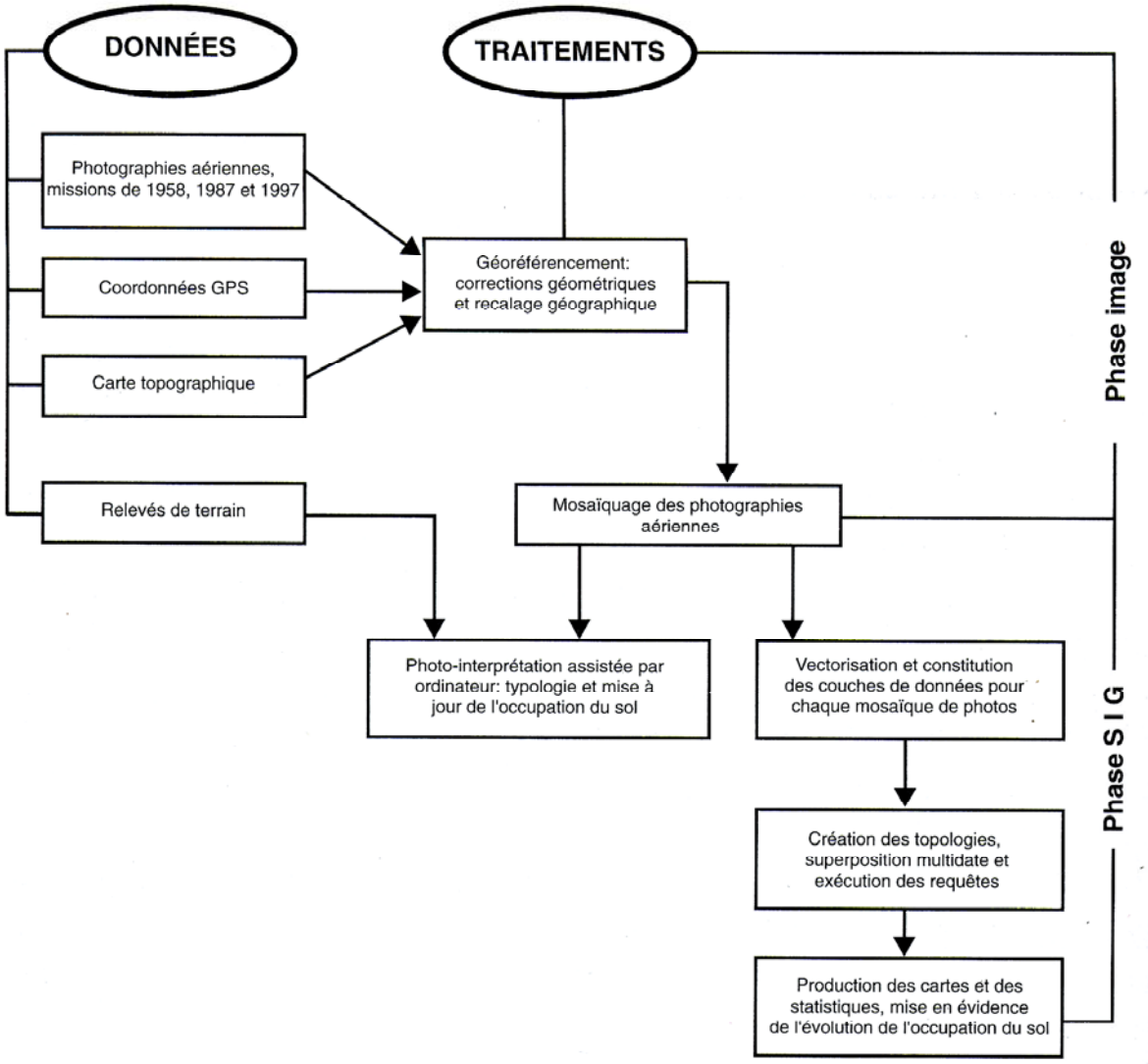


Figure 17. Méthode d'analyse des abattis et de l'évolution de l'occupation du sol à partir des photographies aériennes de Saint-Georges de l'Oyapock

Les méthodes de détection des changements se regroupent en deux catégories principales suivant que la finalité recherchée est la visualisation simple des changements et/ou la quantification de leurs impacts. On distingue les traitements

qualitatifs des traitements quantitatifs. L'application de ces traitements est généralement précédée d'opérations destinées à mettre en harmonie les données d'entrée, de manière à ce que leur superposition soit parfaite et rende possible la détection des changements. Ces opérations concernent essentiellement les corrections géométriques et radiométriques qui permettent de s'assurer que les changements détectés ne sont pas dus à une variation des conditions d'acquisition (inclinaison solaire, situation atmosphérique, caractéristiques des capteurs, etc.), mais résultent effectivement de la modification des états de surface entre plusieurs acquisitions espacées dans le temps.

III.1. Méthodes et techniques de traitements qualitatifs

Elles servent à mettre en évidence et à identifier visuellement les endroits où les états de surface ont subi des transformations au cours d'un intervalle de temps donné. Les images multidates sont associées de manière à mettre en exergue les changements radiométriques correspondant aux modifications survenues dans l'occupation du sol. Du fait qu'il s'agit simplement de déceler les changements sans les quantifier, ces méthodes et techniques sont dites pré-classificatoires ou d'accentuation d'images (Mas, 2000). L'association d'images se fait au moyen d'opérations mathématiques de type soustraction, division et vecteur des changements. Ces opérations peuvent porter soit sur les canaux bruts (compositions colorées multidates), soit sur les « néo-canaux » issus d'indices de végétation ou de composantes principales (combinaisons multidates de néo-canaux).

III.1.1. La soustraction d'images

Elle permet d'obtenir une image des différences radiométriques se rapportant au laps de temps qui sépare les enregistrements. Les pixels qui ont conservé les mêmes valeurs radiométriques durant ce laps de temps sont dits invariants. Ils correspondent aux états de surface qui n'ont pas subi de modification. Lorsque la soustraction des valeurs radiométriques donne une différence, celle-ci traduit un changement d'état de surface.

L'image des différences radiométriques se prête à une interprétation de l'évolution de l'occupation du sol en termes de changement/non changement. Toutefois, suivant la diversité des informations contenues dans les images, l'identification de la nature des changements sur l'image résiduelle sera plus ou moins délicate et complexe. En effet, la soustraction des valeurs radiométriques peut donner un résultat identique pour des types d'occupation du sol différents (par exemple, 150-100 = 125-75), ce qui est susceptible d'entraîner une confusion dans l'identification de la nature des changements. Dans ce cas, une bonne connaissance de terrain est indispensable pour déterminer la nature et la signification des changements. Par ailleurs, puisque la soustraction se fait pixel à pixel, ceux-ci doivent correspondre exactement aux mêmes surfaces au sol. La soustraction d'images présente donc une grande sensibilité à la qualité de la superposition multidate (Mas, 2000).

III.1.2. La division d'images

En divisant les valeurs radiométriques d'une image acquise à une date x par celles d'une autre image de la même scène acquise à la date y, on obtient une image de ratios qui caractérisent la variation des radiométries entre les deux dates. L'analyse de ces ratios permet de localiser les endroits qui ont subi des changements. Au cas où les états de surface n'ont pas sensiblement changé entre les deux dates, on obtiendra des ratios proches de 1, ce qui est significatif d'une absence de changement ou d'un changement insignifiant. Par contre, si la division donne des rapports largement supérieurs ou inférieurs à 1, ils traduiront une modification intense des états de surface. L'interprétation des résultats à l'aide des connaissances de terrain permet de préciser la nature, le sens et le degré d'intensité des changements. La division d'images peut quelques fois se heurter à certaines difficultés : cas où des pixels du dénominateur présentent des valeurs nulles (problème de division par zéro).

En dehors de la soustraction et de la division d'images, la littérature sur la détection des changements propose d'autres techniques de traitements qualitatifs dont l'usage

est cependant moins fréquent. C'est en particulier le cas de l'analyse par vecteurs de changement.

III.1.3. Les vecteurs de changement

Ils sont élaborés en deux étapes (Lambin et Strahler, 1994a,b) : on définit d'abord des indicateurs d'occupation du sol à partir d'une série d'images NOAA AVHRR ; ces indicateurs comprennent le NDVI, la température de surface et la structure spatiale. Ensuite, les vecteurs de changement sont conçus suivant un modèle associant les informations fournies par ces indicateurs mesurés à des dates différentes. Ces vecteurs sont caractérisés par une direction qui renseigne sur le type de changement, et par une amplitude qui indique l'intensité ou l'importance du changement. Ils permettent de décrire l'évolution inter-annuelle des indicateurs d'occupation du sol. Toutefois, l'analyse des vecteurs en termes de nature et d'intensité des changements paraît complexe et explique sans doute l'usage peu courant de cette technique.

Les trois techniques que nous venons de présenter font partie des techniques dites de combinaison ponctuelle, car elles mettent en œuvre des opérations mathématiques qui se font de pixel à pixel (Mas, 2000). Il existe des techniques dites de combinaison globale ; elles sont similaires aux superpositions de type empilement de couches dans un SIG. Dans ce cas, la combinaison ne se fait pas par superposition stricte pixel à pixel (sauf si on utilise les opérateurs ponctuels de type soustraction et division). Cette catégorie de techniques comprend les compositions colorées de canaux bruts et de néo-canaux.

III.1.4. Les compositions colorées de canaux bruts

Il s'agit de superpositions d'images enregistrées à des dates différentes. Les informations multidates contenues dans les différentes bandes spectrales sont associées dans le plan colorimétrique RVB. Lorsque la nature du changement est connue, il est indiqué d'associer les enregistrements des canaux qui sont sensibles au type de changement à détecter. Ainsi, pour mettre en évidence les modifications

survenues dans les formations végétales, nous avons réalisé des compositions colorées multidates en associant les canaux du moyen infrarouge, du proche infrarouge et du rouge dans le plan RVB. La figure 18, qui résulte d'une composition colorée multidate associant une image Landsat TM et une image Spot 4 HRVIR, montre l'évolution des défrichements agricoles dans la région de Charvein entre 1992 et 1999.

Les synthèses additives et soustractives des couleurs enrichissent l'analyse visuelle, ce qui permet de localiser les endroits où il y a eu changement d'états de surface. Toutefois, dans la littérature, des exemples montrent que l'éventail et les degrés d'intensité des couleurs sont parfois si larges que l'interprétation et la reconnaissance des changements deviennent complexes. Dans ce cas, la comparaison simultanée des images affichées séparément, aide à identifier les significations thématiques des changements identifiés.

Une variante de cette technique consiste à réaliser des compositions colorées associant les images multispectrales préalablement converties en niveaux de gris (Milne et O'Neil, cités par Mas, 2000 ; Sader et Winne, 1992). De la sorte, sur l'image multidate obtenue, les endroits n'ayant pas subi de changements apparaissent en niveaux de gris, tandis que ceux qui ont subi des modifications apparaissent en couleur.

III.1.5. Les combinaisons de néo-canaux multidates

Les transformations d'images brutes en composantes principales (ACP) d'une part, et en indices de végétation d'autre part, sont les techniques les plus utilisées pour détecter les changements à partir de néo-canaux (Hayes et Sader, 2001 ; Sader et *al* ; 2001 ; Franklin et *al*., 2000 ; Fotsing, 1998 ; Pohl et *al*., 1998 ; Michner et Houhoulis, 1997 ; Sader, 1995 ; Sader et Winne, 1992). La combinaison des composantes principales (ACP) ou d'indices de végétation (très souvent le NDVI) s'effectue de manière identique à la réalisation des compositions colorées multidates associant les canaux bruts (permutations dans le plan RVB).

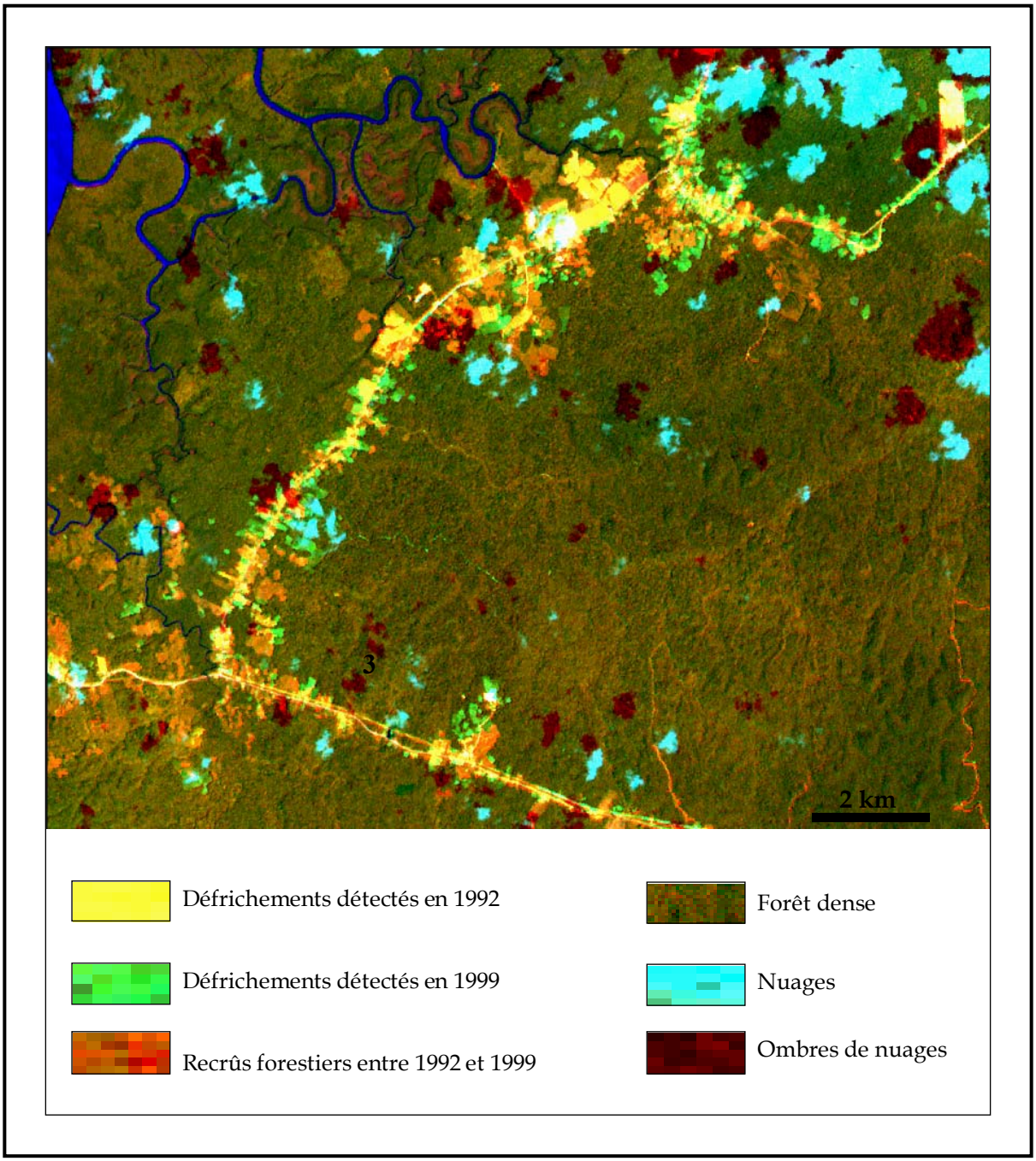


Figure 18. Composition colorée multidate montrant l'évolution des défrichements agricoles dans la région de Charvein entre 1992 et 1999

(superposition des images Landsat TM du 22/09/92 et Spot Xi du 26/11/99 : TM5 en rouge, Xi4 en vert et Xi3 en bleu)

Généralement, les premières composantes rassemblent les pixels correspondant aux états de surface restés invariants, tandis que les pixels dont le contenu thématique a changé se retrouvent dans les dernières composantes. En associant les composantes principales de deux extraits d'images Landsat TM du Nord du Brésil, nous avons obtenu une image synthétique sur laquelle on observe l'évolution des fronts pionniers entre 1988 et 1998 (fig. 19).

Les essais portant sur les indices de végétation, et en particulier le NDVI, se sont avérés peu intéressants dans l'optique de l'interprétation visuelle et la reconnaissance thématique intuitive des changements. Nous allons donc laisser de côté les indices de végétation.

Les compositions colorées multidates associant les composantes principales sont de qualité visuelle moins bonne que celles qui utilisent les canaux bruts. D'après de nombreux auteurs (Lillesand et Kiefer, cités par Sader et *al.*, 2001 ; Mas, 2000 ; Singh, 1986), les corrections radiométriques préalables ne sont pas absolument nécessaires dans le cas d'analyses multidates faisant appel aux ACP, car les différences d'étalonnage sont compensées automatiquement au moment du calcul des néo-canaux.

Comme pour les méthodes présentées précédemment, il est difficile d'interpréter et de préciser la nature des changements à partir des différences, des ratios ou de la superposition globale des ACP. En outre, ces opérations ne permettent pas de mesurer l'étendue des changements d'occupation du sol. Pour le faire, il est indispensable d'appliquer des traitements de type quantitatif.

III.2. Méthodes et techniques de traitements quantitatifs

Elles ont pour but de mesurer l'ampleur des changements exprimée généralement en termes de superficies ayant subi les modifications d'états de surface. La quantification se rapporte alors à la réduction et/ou l'augmentation de l'étendue des états de surface touchés par les changements. Les statistiques qui rendent compte

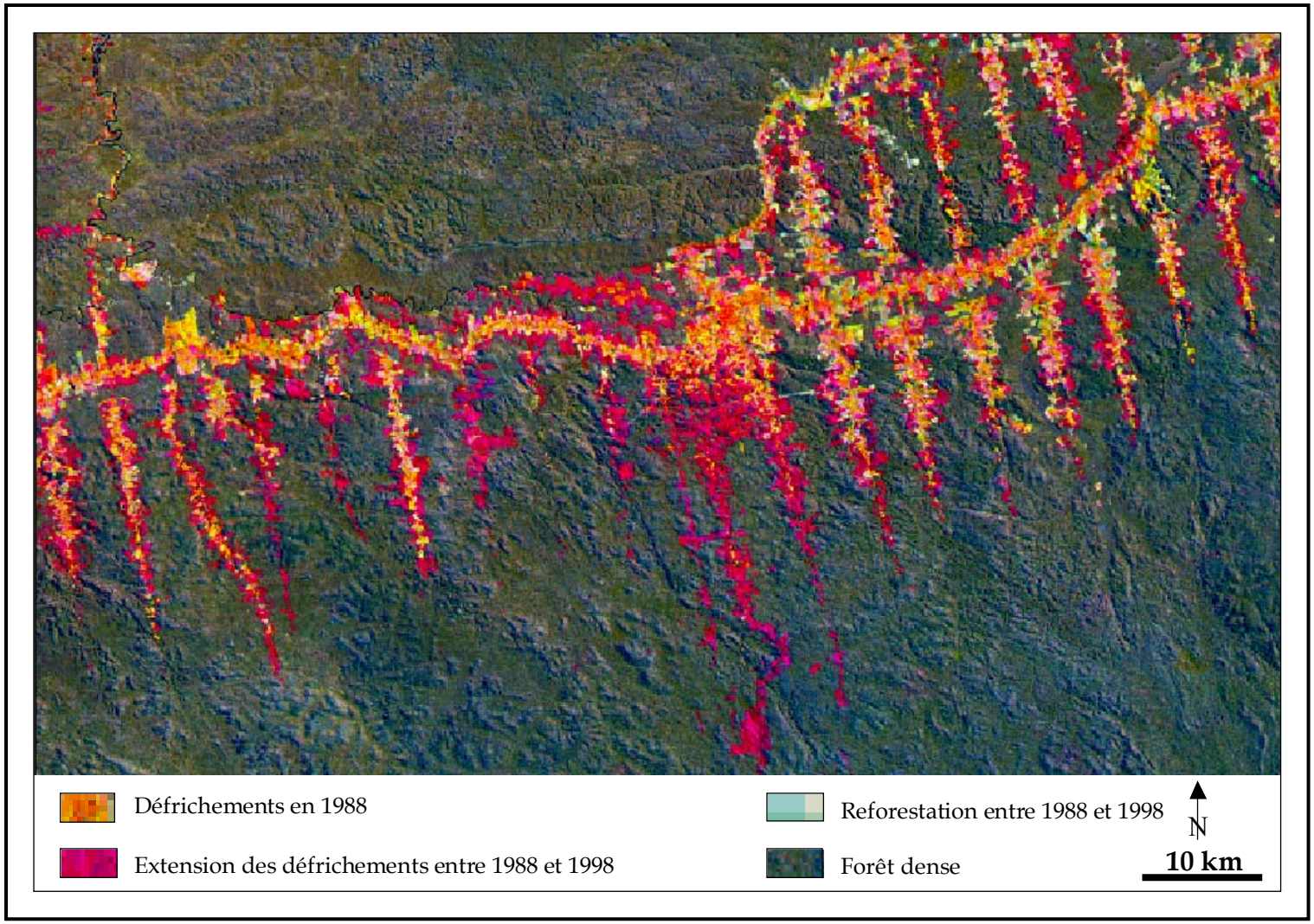


Figure 19. Composition colorée multidate associant les composantes principales de deux images Landsat TM
Mise en évidence de l'évolution des fronts pionniers dans le Nord du Para entre 1988 et 1998

(1ère composante de TM 98 en rouge, 2ème composante de TM 88 en vert, 4ème composante de TM 98 en bleu).

de ces changements sont issues de classifications d'images réalisées soit sur les compositions colorées, soit sur les combinaisons de néo-canaux. On peut distinguer deux variantes de cette approche : les classifications synchronisées ou conjointes, et les classifications séparées ou disjointes.

III.2.1. Les classifications synchronisées ou conjointes

Elles sont conduites sur un ensemble d'images multidates associées (Rogan et *al*., 2002 ; Hayes et Sader, 2001 ; Sader et *al*., 2001 ; Selleron, 1995 ; Singh, 1986). Ainsi, pour mesurer l'extension du couvert végétal entre deux dates, on réalise d'abord une composition colorée rassemblant les canaux moyen infrarouge des deux images (fig. 18), et la classification est ensuite menée sur la composition colorée regroupant les deux images. De la sorte, les statistiques obtenues ne sont pas caractéristiques d'une situation statique, car elles se rapportent non pas à une date, mais à l'évolution survenue durant le laps de temps séparant les deux enregistrements. Ces statistiques permettent de rendre compte de l'amplitude des changements relevés.

Pour que cette approche soit efficace, il convient d'identifier au préalable la nature des changements, ce qui rend pertinent le choix des thèmes à classifier et à mesurer. Les critiques généralement formulées à l'égard de cette technique ont trait au nombre considérable de canaux multispectraux sur lesquels la classification est effectuée. Ce nombre est le résultat de la combinaison de plusieurs images acquises à des dates différentes. Plus les images conjointes sont nombreuses, plus les calculs et l'identification de la nature des changements sont complexes. On peut pallier partiellement à ce problème en recourant aux composantes principales pour synthétiser et réduire le volume des images à traiter (fig. 19).

III.2.2. Les classifications disjointes ou séparées

De manière classique, pour deux images d'une même scène enregistrées à des dates différentes, après la classification de chaque image, la détection des changements se fait par comparaison des résultats des deux

classifications séparées (Chen Xiuwan, 2002 ; Iltis et *al*., 2001 ; Mas, 1999 ; Fotsing, 1998 ; Youta-Happi, 1998 ; Mertens et Lambin, 1997 ; Runge et Neumer, 1996 ; Cohen et Hotyat, 1995 ; N'Guessan, 1993 ; Karimoune et *al*., 1993 ; Hotyat et Veyret, 1991 ; Pouyllau et *al*., 1990 ; Ducret et Fotsing, 1987 ; Singh, 1986). La comparaison post-classification permet de distinguer les éléments stables de ceux qui ont changé entre les deux dates.

Cette technique est très courante et ne nécessite pas de corrections radiométriques préalables, car les images acquises à des dates différentes ne sont pas associées, mais traitées de manière indépendante. Par ailleurs, on peut utiliser des données annexes (cartes topographiques, photos aériennes) au moment des classifications initiales, et associer ensuite ces données aux images classées. L'exercice peut être mené de manière analogique par l'analyse visuelle simultanée sur écran ou sur des tirages transparents superposés manuellement. De plus en plus, les croisements post-classifications sont effectués par l'intermédiaire de systèmes informatiques de type SIG (Chen Xiuwan, 2002 ; Bouazzaoui et *al*., 2001 ; Sader et *al*., 2001 ; Roy et Tomar, 2001 ; Imbernon, 1999a,b,c ; Michener et Houhoulis, 1997). Par des requêtes, on obtient des statistiques de synthèse qui décrivent l'évolution des états de surface.

L'efficacité de la détection des changements par les classifications disjointes dépend de la qualité des classifications indépendantes qui sont ensuite juxtaposées. Les erreurs éventuelles commises sur chaque classification séparée se répercutent sur les résultats finaux croisés, ce qui est de nature à entraîner une surestimation ou une sous-estimation des changements. Ces défaillances peuvent être corrigées par le caractère interactif de la méthode (va et vient entre les images multidates affichées côte à côte). La détection et la mise en évidence des modifications peuvent également être facilitées par l'identification préalable des thèmes de changement à quantifier.

Ce rapide tour d'horizon montre que les méthodes et techniques employées en télédétection des changements sont très nombreuses et présentent chacune des

avantages et des inconvénients (tabl. 25). La fiabilité des résultats est souvent évaluée à partir de l'application successive ou combinée de plusieurs méthodes et techniques. L'exercice est délicat car l'interprétation des résultats est très complexe en l'absence de relevés de terrain et de connaissances sur les mécanismes qui sous-tendent les changements radiométriques imputés aux modifications des états de surface. Dans la réalité, les conditions idéales sont rarement réunies pour que les différences de valeur radiométrique de deux acquisitions effectuées à deux dates données, soient uniquement le fait des changements d'occupation du sol.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que ces méthodes et techniques permettent seulement de détecter les changements que montrent des enregistrements décalés dans le temps. A ce titre, ces changements correspondent simplement à des différences d'états à des dates précises, et n'expriment pas de manière explicite une dynamique continue dans le temps. Cependant, les informations obtenues constituent une base fiable pour des investigations sur les processus et les modalités de déroulement des dynamiques qui ont pu avoir lieu entre les différents enregistrements.

L'automatisation des traitements débouche de plus en plus sur de nouvelles méthodes de détection et de quantification des changements. Il en est ainsi des systèmes experts (Rogan et *al.*, 2002 ; Wang, cité par Mas, 2000), des ondelettes et fractales (Carvalho et *al.*, 2001), de la logique floue (Fisher et Pathirana, 1993), et de la généralisation spatio-temporelle (Woodcock et *al.*, 2001). La simulation et la modélisation des processus ou trajectoires de changements (Mertens et Lambin, 2000) permet de prédire les endroits susceptibles de subir les changements (Veldkamp et Lambin 2001). Dans le contexte tropical où les conditions géographiques et atmosphériques limitent la possibilité de disposer d'images de bonne qualité, les classifications disjointes paraissent appropriées. Elles ne requièrent pas de rigoureuses calibrations radiométriques. En s'aidant de l'expertise de terrain, les comparaisons post-classifications offrent la possibilité de corriger les erreurs qui donnent souvent lieu à la détection de « faux changements » (Mas, 2000).

	Méthodes et techniques	Avantages	Inconvénients
Traitements qualitatifs	soustraction d'images division d'images	simples à mettre en oeuvre	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)
Traitements quantitatifs	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 25. Avantages et inconvénients des méthodes et techniques de détection des changements

La synthèse que nous venons de présenter fait le point sur les méthodes et techniques de caractérisation de l'occupation du sol d'une part, et de détection des changements qui surviennent dans l'environnement d'autre part. Dans les deux cas, on peut regrouper les méthodes et techniques en deux catégories : l'approche analogique pour une description qualitative, et l'approche numérique pour une description quantitative. Appliquées aux images disponibles pour cette étude, quelles organisations spatiales des défrichements ces méthodes vont-elles permettre de mettre en évidence ?

CHAPITRE 5

MISE EN EVIDENCE ET ANALYSE DE L'ORGANISATION SPATIALE DES DEFRICHEMENTS AGRICOLES EN AMAZONIE

Nous allons utiliser les méthodes de traitement d'images présentées dans le chapitre précédent pour caractériser les configurations télédétectées des défrichements agricoles suivant les trois étapes de la démarche de caractérisation (détection, identification et analyse). La diversité des enregistrements et la variabilité de la taille des parcelles défrichées incitent à opter pour une approche multi-capteur afin de tirer parti de la complémentarité des données.

En nous inspirant de l'approche hiérarchique descendante développée par Fotsing (1998), la caractérisation que nous proposons part du niveau d'observation le plus large au niveau le plus fin, c'est à dire du niveau régional au niveau local, en utilisant les capteurs adaptés à chaque niveau[1] (fig. 20). De la sorte, les glissements d'un niveau scalaire à un autre permettront de décrire les détails perceptibles. La description s'articule alors du général au particulier. Au niveau régional par exemple, l'image NOAA AVHRR, avec son large champ de couverture (2700 km), permet d'embrasser d'un seul tenant l'ensemble de la zone d'intérêt : Guyane française et Nord du Brésil. L'information ainsi obtenue étant grossière, le passage à un niveau d'observation plus restreint est nécessaire pour accéder aux détails et affiner l'analyse par l'utilisation d'images de plus haute résolution spatiale (Landsat, Spot, photographies aériennes).

[1] Nous avons préféré l'expression « niveau d'observation » à celle d' « échelle ». Le terme « échelle » se rapporte très souvent aux représentations cartographiques, aux rapports entre les dimensions réelles sur le terrain et leur transcription sur les cartes. Le niveau d'observation renvoie à une étendue vue. Il s'articule en plusieurs échelons selon l'immensité de la portion à voir et les détails qu'on souhaite observer. Toutefois, il y a une correspondance implicite entre échelle et niveau d'observation, surtout lorsque ce qui est vu figure sur une image ou sur une carte.

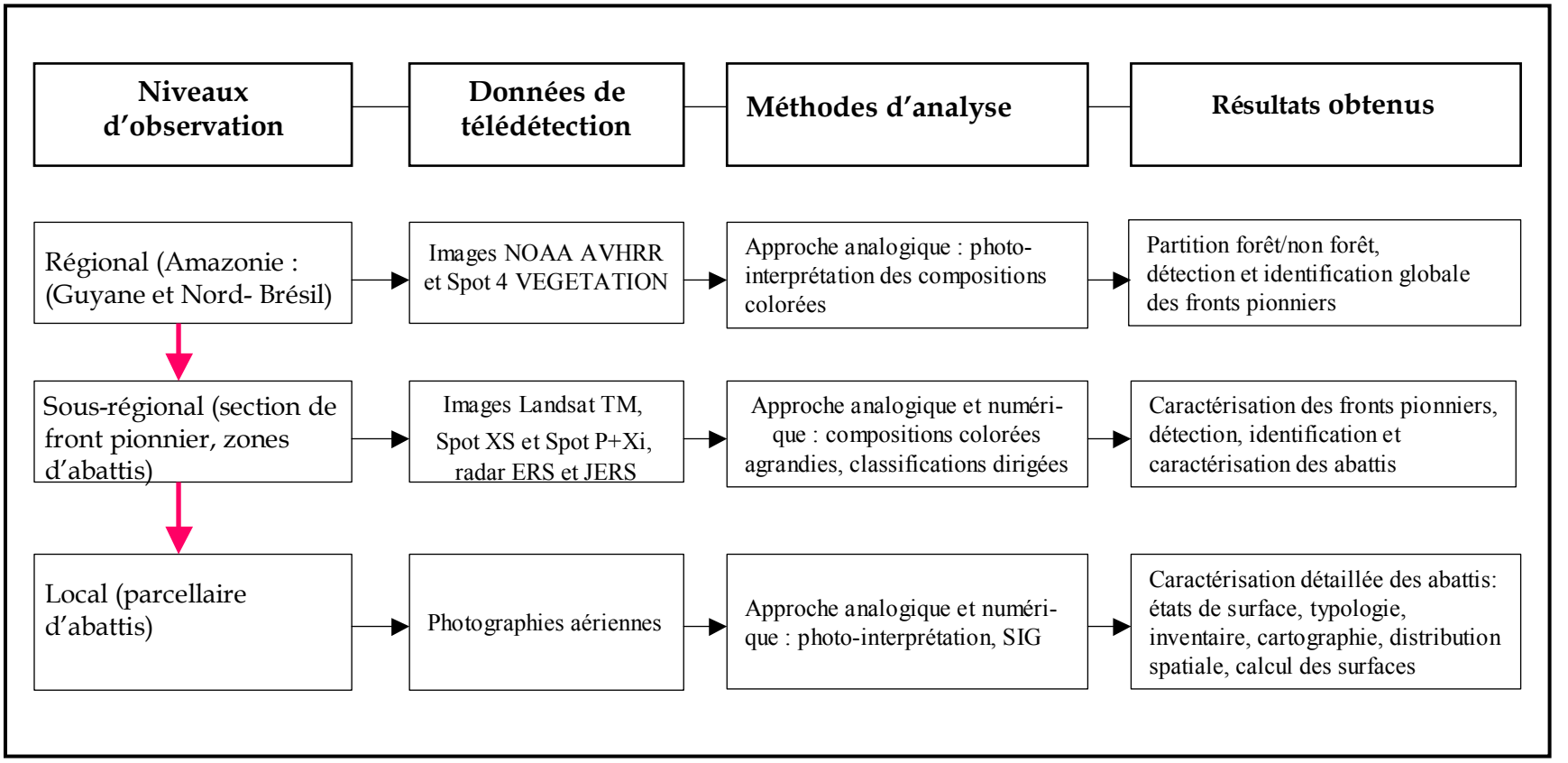


Figure 20. L'approche hiérarchique descendante pour une caractérisation de plus en plus affinée

I. Détection et identification des défrichements de grande ampleur au niveau régional

A ce niveau d'observation, nous avons utilisé les images AVHRR de NOAA et VEGETATION de Spot 4 pour appréhender de manière globale la forêt amazonienne. Les compositions colorées montrent la structuration d'ensemble de la zone couverte : Surinam, Guyane française et Etats du Para et d'Amapa au Nord du Brésil (fig. 21 et 22).

La composition colorée de l'image NOAA AVHRR combine les canaux 1 (rouge), 2 (proche infrarouge) et 4 (infrarouge thermique) suivant le plan RVB (fig. 21). Pour l'image Spot 4 VEGETATION, ce sont les canaux 4 (moyen infrarouge), 3 (proche infrarouge) et 2 (rouge) qui sont associés dans l'ordre colorimétrique rouge, bleu, vert (fig. 22). Sur cette deuxième composition colorée, la forêt dense apparaît en vert-jaune, tandis que les autres couverts sont en rouge-rose et en vert-clair[2]. Ils correspondent aux savanes (*cerrados*, *campos*), aux mangroves et aux traces d'occupation anthropique.

Sur les deux images (fig. 21 et 22), la couverture végétale varie sur la frange orientale bordant l'océan. Cette variation révèle la différence entre la forêt dense et les autres couverts (savanes, marais, mangroves, défrichements). Elle apparaît plus nettement sur la composition colorée VEGETATION que sur l'image AVHRR, du fait que les enregistrements des deux capteurs ne se font pas dans les mêmes longueurs d'onde. Par conséquent, ils ne donnent pas les mêmes compositions colorées.

En dépit des plages de nuages qui masquent certains secteurs, on observe quelques éléments saillants qui structurent l'espace : il s'agit notamment des fleuves (l'Amazone au Sud de la Guyane) et des barrages (Brokopondo au Surinam et Petit Saut en Guyane française).

[2] Les couleurs qui caractérisent les types de couverts résultent des propriétés spectrales de ces couverts et du choix des couleurs d'affichage des canaux dans le plan RVB.

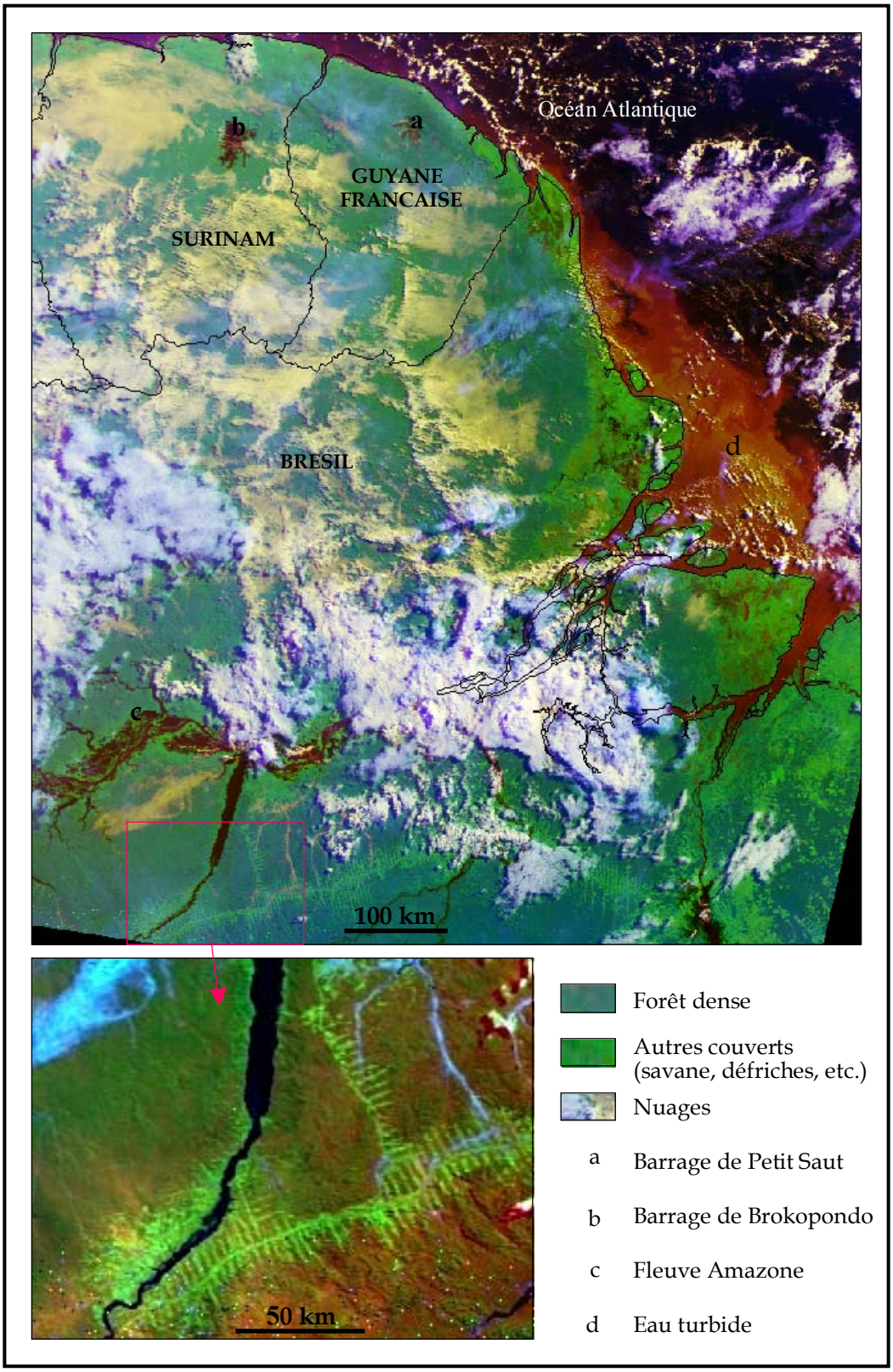


Figure 21. Détection et identification des fronts pionniers sur une image NOAA AVHRR (image du 06/06/00, composition colorée R1, V2, B4)

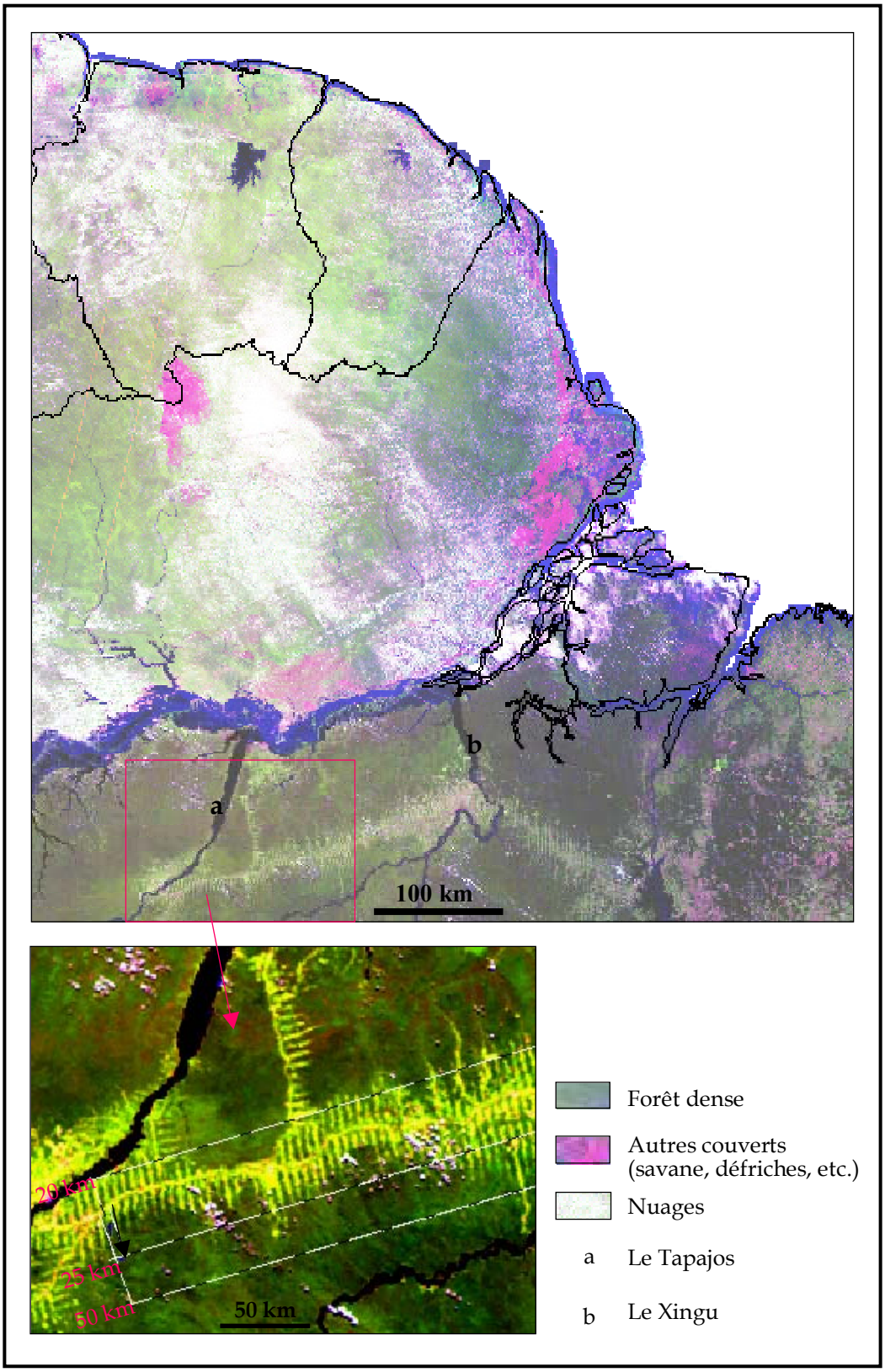


Figure 22. Détection et identification des fronts pionniers sur une image Spot 4 VEGETATION (image du 07/06/00, composition colorée R4, V3, B2)

On observe au Sud de l'Amazone, dans le Nord du Para, une structure linéaire sous forme de squelette : c'est un front pionnier. La régularité des traces indique qu'il résulte du modèle de colonisation agricole planifiée mis en place par l'Etat brésilien en 1970 dans le cadre de la politique d'intégration nationale (cf. chap. 3).

Cette colonisation aboutit à une structure en peigne faite de rentrants et de saillants qui alternent tous les 5 km environ, le long de la section de la route transamazonienne reliant Itaituba à Maraba via Altamira (Tsayem et *al*., 2001). Les saillants pénètrent en forêt sur une distance moyenne de 20 à 30 km, et constituent des axes de défrichements agricoles. Ils apparaissent en vert-clair sur l'image NOAA AVHRR (fig. 21), et en jaune sur l'image Spot 4 VEGETATION (fig. 22). Les rentrants correspondent aux lambeaux de forêt intercalés entre les parcelles défrichées. D'après Droulers (1995), la distribution des parcelles se faisait par lots de 10 ha à partir de la base des saillants, et jusqu'à 500 ha au sommet.

Ces deux exemples (fig. 21 et 22) montrent que les images de faible résolution spatiale permettent d'appréhender la structure géométrique des défrichements de type fronts pionniers. La largeur au sol de ces images (environ 2500 km) autorise le repérage et la cartographie de la déforestation de grande ampleur[3] au niveau régional ou continental (Achard et *al*., 1998 ; TREES, 1998). Cependant, avec de telles données, il est très difficile de préciser si les espaces déforestés correspondent aux cultures, aux pâturages, aux jachères, aux forêts secondaires, aux villes, etc. A ce niveau d'observation, on se limite à la détection et à la reconnaissance générale des grandes structures spatiales. Aussi, on remarque que les abattis sont totalement indétectables en raison de leurs dimensions au sol. L'analyse aux niveaux sous-régional et local, avec les données de résolution fine, apportera sans doute plus d'informations sur ces défrichements.

[3] ou "deforestation hot spots", "active deforestation area" (TREES, 1998).

II. analyse des fronts pionniers et identification des abattis au niveau sous-régional

Les images Landsat et Spot, par leurs résolutions spatiales, offrent une vision plus détaillée de l'espace sur des surfaces restreintes (de 3600 à 35 000 km²) correspondant au niveau d'observation sous-régional. Nous les avons utilisées d'une part pour analyser l'organisation du parcellaire des fronts pionniers, et d'autre part pour détecter et identifier les abattis.

II.1. L'organisation du parcellaire des fronts pionniers

L'agrandissement d'images Spot 4 VEGETATION offre une vision générale de la structure des fronts pionniers. Les images Spot et Landsat améliorent la mise en évidence de cette structure spatiale constituée d'un axe routier principal et d'un réseau de pistes perpendiculaires à l'axe principal (fig. 23). Deux types d'états de surface alternent dans l'agencement interne du parcellaire. Le premier, en rose et en position centrale le long de l'axe principal et des axes secondaires, correspond vraisemblablement aux sols peu ou pas recouverts de végétation (bâti, routes, défrichements récents). Le second, en vert-clair, est situé à la périphérie des axes et correspond sans doute aux pâturages.

La photo-interprétation des compositions colorées d'images Landsat TM et Spot XS affichées à une échelle comprise entre 1/100 000 et 1/40 000 (propice à l'analyse analogique), permet de décrire l'arrangement du parcellaire du front pionnier (fig. 24). Les composantes et les contours sont bien soulignés, et la structure apparaît dans toute sa diversité. Un ensemble de parcelles rectangulaires se greffent les unes aux autres comme les carreaux d'un damier. Les parcelles aux contours bien définis s'individualisent surtout si elles présentent un fort contraste avec les parcelles adjacentes. Les mesures effectuées sur les parcelles de l'axe central donnent une surface moyenne d'environ 30 ha par parcelle. En analysant les valeurs radiométriques des pixels, il est possible de les distinguer sur la base des réflectances dans les différentes longueurs d'onde. L'interprétation des spectres permet alors de

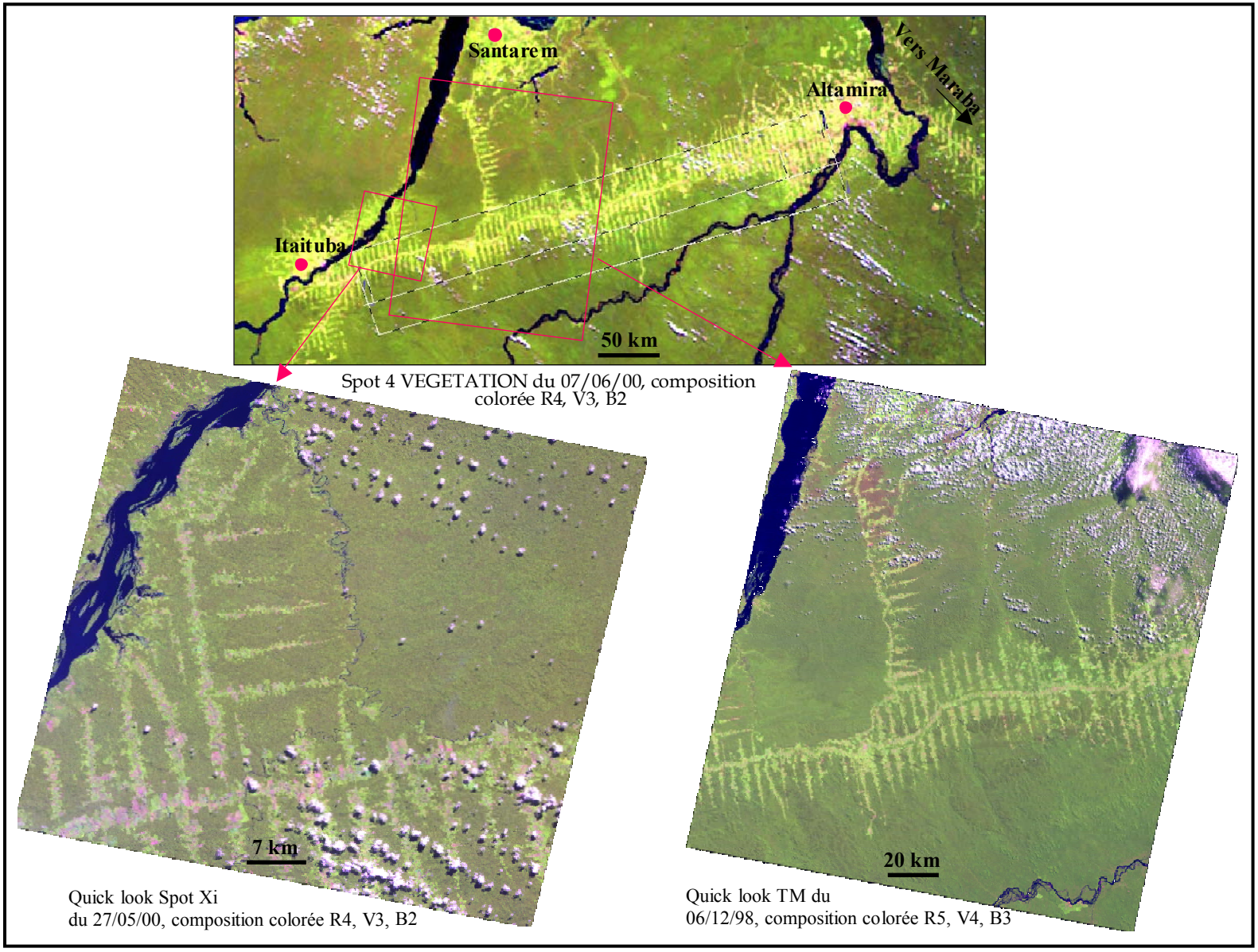


Figure 23. Illustration de la sous-région du Centre du Para et situation des scènes Spot et TM utilisées pour caractériser les fronts pionniers

Figure 24. Structure et organisation des fronts pionniers : caractérisation du parcellaire au niveau sous-régional à partir d'images Landsat TM et Spot Xi

reconnaître les pâturages et les friches d'une part, et d'autre part les cultures, le bâti et les routes (fig. 24).

L'analyse des fronts pionniers à partir d'images Landsat TM et Spot XS met en évidence l'hétérogénéité des parcelles défrichées qui composent la structure d'ensemble perçue de manière homogène au niveau régional (fig. 21, 22 et 23). Comme on peut le constater, le passage d'un niveau d'observation plus large à un niveau plus restreint s'accompagne de précisions sur le contenu et l'organisation de l'espace. Les images Landsat TM et Spot XS sont donc suffisantes pour détecter, identifier et analyser les parcelles de fronts pionniers. Qu'en est-il des abattis qui ont des surfaces plus limitées ?

II.2. Détection et identification des abattis

Dans les développements précédents, nous avons vu que les abattis ne sont pas détectables au niveau régional. Cela est dû à la faible emprise spatiale de ces défrichements au regard des caractéristiques spatiales et spectrales des capteurs utilisés à ce niveau d'observation (images NOAA AVHRR et Spot 4 VEGETATION). Il convient donc de recourir aux images à haute résolution. La caractérisation commence donc au niveau sous-régional, compte tenu des dimensions au sol des images à haute résolution (60 x 60 km pour les scènes Spot, et 185 x 185 km pour les scènes Landsat). A ce niveau d'observation, les analyses que nous avons effectuées ont porté sur Charvein, Maripasoula et Saint-Georges (fig. 9)[4]. Le site de Charvein a fait l'objet d'une étude approfondie en raison de la disponibilité de nombreuses données multi-capteurs : images Landsat TM, Spot HRVIR, radar JERS-1 et ERS-1, etc. L'étude des autres sites a été faite à partir d'images Spot, seules données satellites disponibles. Nous présenterons les types d'abattis et d'occupation du sol tels qu'ils sont détectés et identifiés d'abord sur les images optiques, puis sur les images radar.

[4] Rappelons que le choix de ces sites se justifie par le fait qu'ils sont représentatifs du contexte socio-économique et du cadre géographique dans lesquels se pratiquent les défrichements agricoles de type abattis en Guyane française (cf. chap. 3).

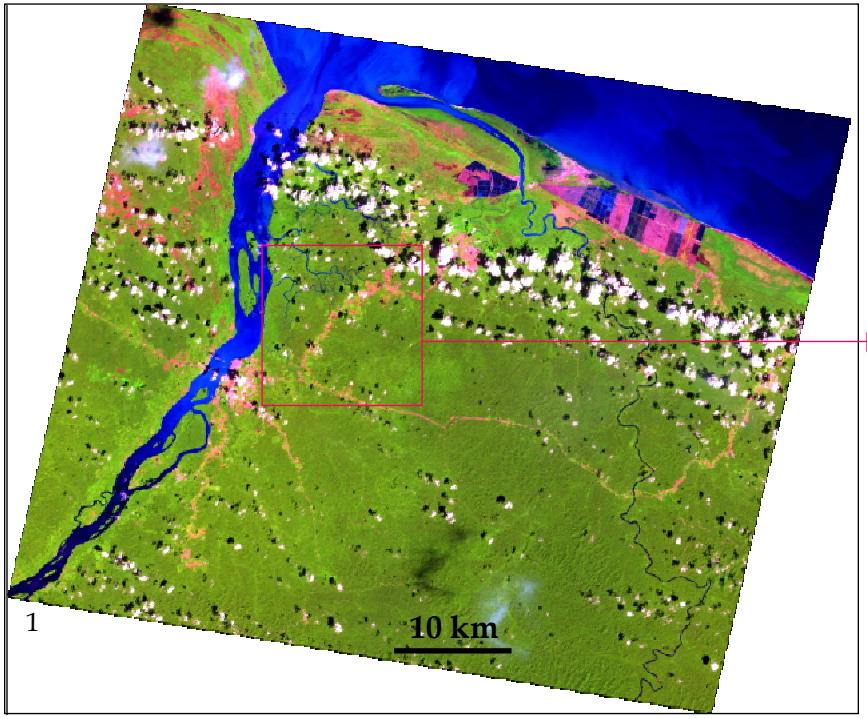
II.2.1. Typologie des abattis et de l'occupation du sol d'après l'imagerie Spot HRVIR et Landsat TM

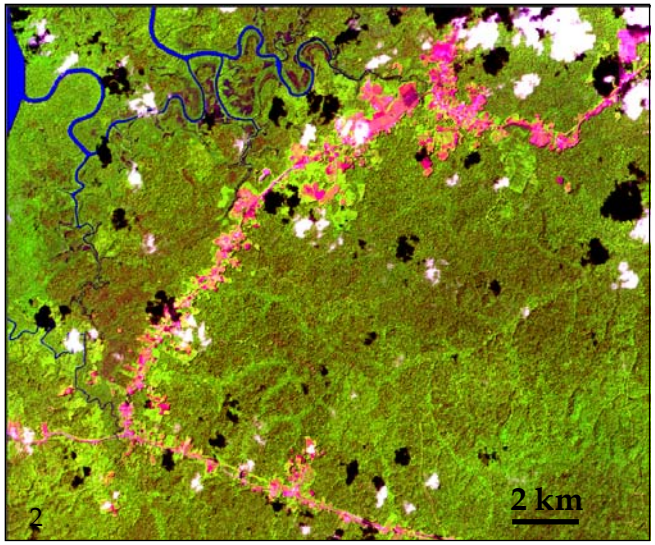
La figure 25 met en évidence la diversité des états de surface des abattis à Charvein (compositions colorées Landsat TM et Spot HRVIR). Ces états de surface correspondent aux étapes du calendrier agricole et aux stades de développement des cultures présentés dans le chapitre 3 (voir fig. 7, p. 76 et planche photo n° 3, p. 77). En fonction du taux de recouvrement du sol par la végétation, les parcelles cultivées apparaissent en rose-rouge, et la végétation secondaire en vert clair, tandis que la végétation dense humide est en vert teinté de brun[5].

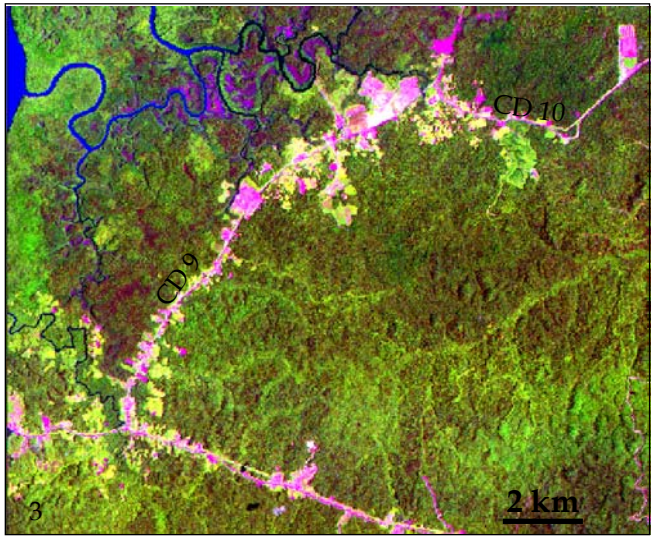
Les profils radiométriques indiquent que la réflectance des abattis varie en fonction de l'importance de la végétation qu'ils portent (fig. 26). Dans le proche infrarouge par exemple, les forêts secondaires, qui sont généralement d'anciens abattis laissés en jachère (avec une végétation arbustive et arborée recouvrant bien le sol) ont une radiométrie supérieure à celle des forêts denses. Cette radiométrie élevée résulte de l'activité chlorophyllienne des forêts secondaires. Elle caractérise aussi les abattis qui portent les cultures depuis 2 ou 3 années. Dans le visible, la proportion de sols nus contenus dans les abattis dont les cultures ne recouvrent pas totalement la surface du sol, se traduit par une radiométrie elle aussi supérieure à celle de la forêt dense. A l'état d'essarts (défrichés mais pas encore mis en culture), les abattis ont un profil radiométrique proche de celui des sols nus ou des surfaces bâties. L'ensemble des spectres (fig. 26) confirme le potentiel discriminant du MIR (canal 4) indisponible sur les images antérieures à Spot 4.

Nous avons appliqué une classification supervisée par maximum de vraisemblance à l'image Spot dans le but de quantifier l'étendue des abattis et des autres catégories d'occupation du sol (fig. 27). Après un masque sur les nuages, des parcelles d'entraînement ont été sélectionnées pour dix thèmes d'occupation du sol identifiés

[5] Les couleurs qui illustrent les états de surface résultent non seulement des propriétés spectrales des différents couverts, mais aussi du choix des couleurs d'affichage des canaux dans le plan RVB au moment de la réalisation de la composition colorée.







Bassin de défrichements (abattis, vergers)

Forêt secondaire

Forêt dense

Eau libre (fleuve Maroni à l'ouest et océan atlantique au nord)

Nuages/Ombre

1: image Spot 4 du 26/11/99, Nord-Ouest de la Guyane, composition colorée R4, V3, B2
2: extrait sur Charvein; 3: extrait Landsat TM du 22/09/92 (composition colorée R5, V4, B3

Figure 25. Détection et identification des abattis au niveau sous-régional à partir d'images Landsat TM et Spot

par analyse des compositions colorées, complétée par des relevés de terrain. Trois classes d'abattis ont ainsi été distinguées en rapport avec les étapes de défrichement et de croissance des cultures qui déterminent les états de surface décrits sur la planche photographique n° 3 (p. 77) :

- Les abattis denses, correspondant aux parcelles sur lesquelles les cultures sont au maximum de leur croissance (2 à 3 ans) et dont le sol est bien recouvert par la végétation ;
- Les abattis peu denses, correspondant aux parcelles sur lesquelles les cultures, en première année de croissance, recouvrent la surface du sol de manière très discontinue ;
- Les essarts, ou parcelles de forêt défrichée mais non encore mises en culture (l'enregistrement satellital ayant eu lieu en novembre, coïncidant avec le début de la période de semis ; voir calendrier agricole, fig. 7, p. 76).

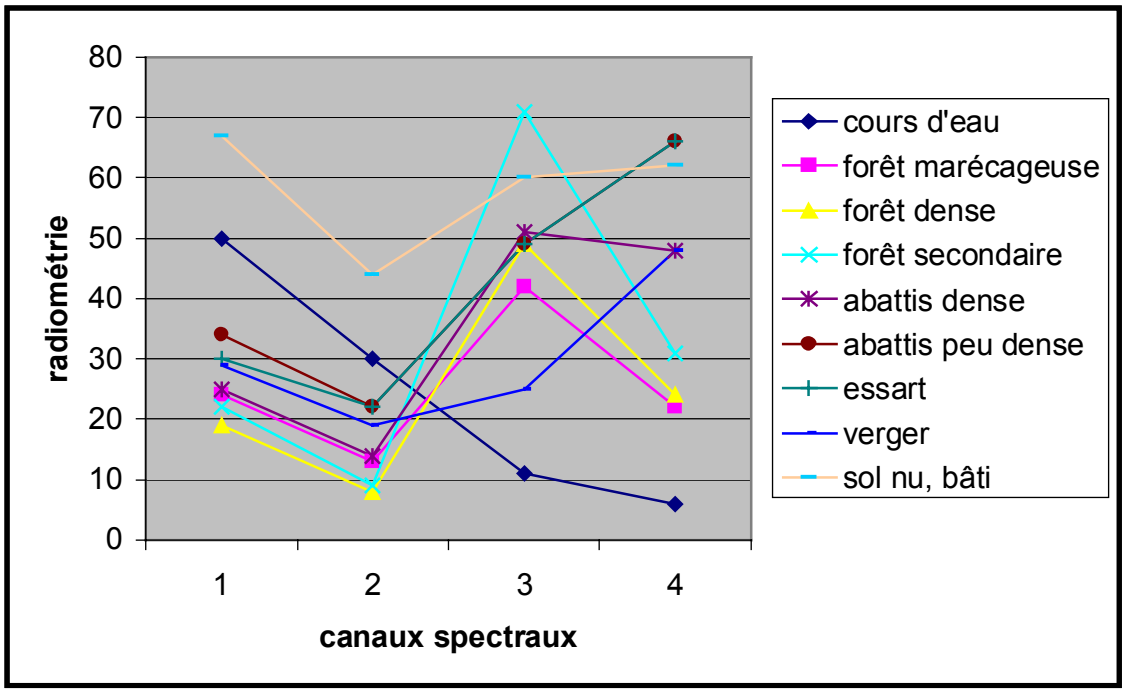
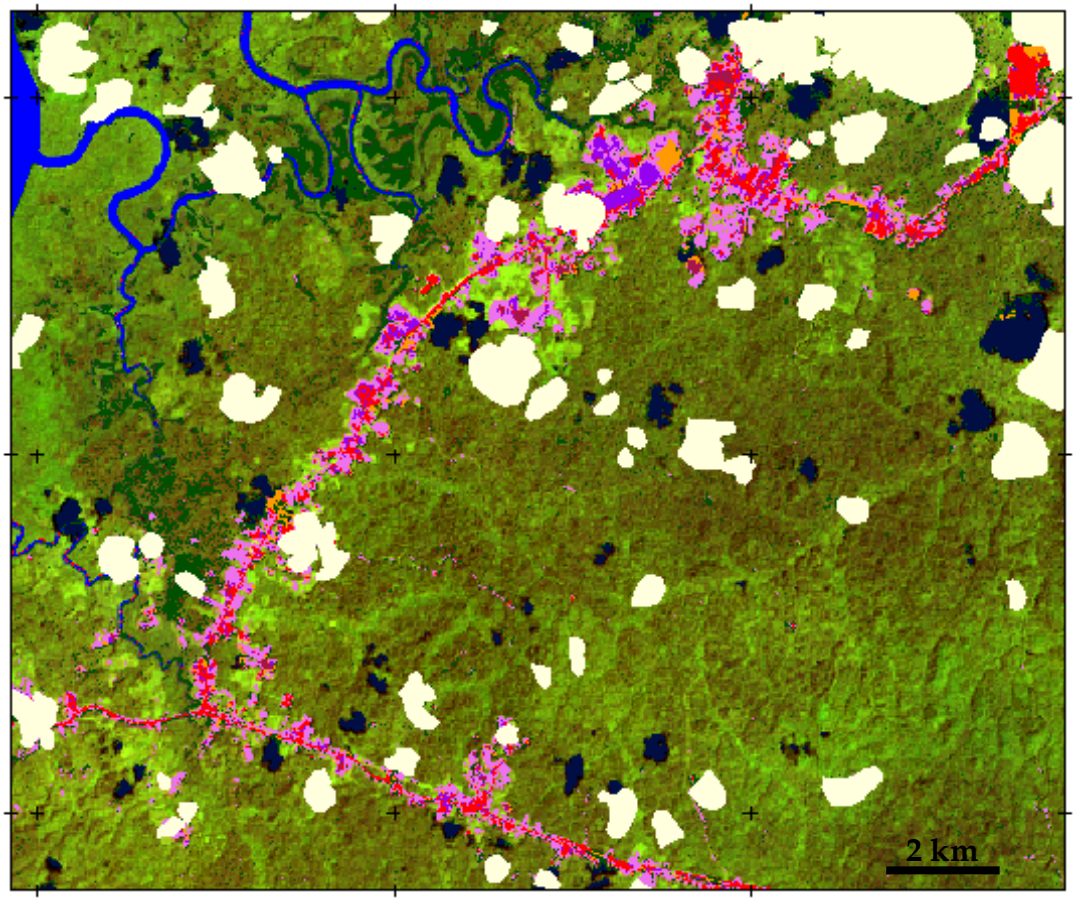


Figure 26. Comportement spectral des types d'occupation du sol à Charvein (extrait Spot HRVIR)

En plus de ces trois classes d'abattis, une classe correspondant aux vergers a été discriminée à partir des caractéristiques spectrales spécifiques de ce type de cultures



Route, bâti, sol nu, essart
Abattis peu denses
Abattis denses
Friches herbeuses
Vergers
Recrûs et forêt secondaire
Forêt dense
Végétation marécageuse
Eau libre
Nuage/ ombre

Types d'occupation du sol	surface (ha)	%
route, bâti, sol nu, essarts	376,9	1,43
abattis peu denses	70,56	0,26
abattis denses	836,5	3,2
friches herbeuses	125,06	0,48
vergers	166,86	0,64
recrûs et forêt secondaire	4808,02	18,36
forêt dense	15107,3	57,69
forêt marécageuse	1390,54	5,31
eau libre	318,82	1,22
nuages	2424,59	9,26
ombre de nuages	562,02	2,15
Total	26187,17	100

Figure 27. Typologie et emprise spatiale des abattis de Charvein d'après la classification dirigée de l'image Spot 4 HRVIR

(fig. 26). Enfin, le bâti et le sol nu ont été rassemblés dans une seule classe en raison de leurs signatures quasi identiques.

L'examen de la matrice de confusion (tabl. 26) indique que la classification des parcelles agricoles (abattis et vergers) est très satisfaisante, avec un taux supérieur à 95%. Par contre, quelques confusions subsistent entre forêt secondaire et forêt dense qui ont des taux de bonne classification un peu plus bas (81% et 87% respectivement).

Les résultats de la classification donnent une superficie de 1560 ha pour l'ensemble des pixels qui représentent les surfaces défrichées (abattis, vergers, essarts, bâti et sols nus), soit 6 % de la surface totale cartographiée qui fait 26 186 ha.

L'exemple de Charvein (fig. 25 et 27) montre que les défrichements agricoles sont de faible étendue et sont localisés essentiellement le long des pistes ou des chemins départementaux (CD). Comment s'organisent les défrichements agricoles ailleurs en Guyane française ? Pour répondre à cette question, nous nous sommes intéressés aux cas de Maripasoula et Saint-Georges de l'Oyapock dans une optique de comparaison avec Charvein.

Tableau 26. Matrice de confusion issue de la classification de l'extrait Spot de Charvein

Classes d'occupation du sol	route, bâti, sol nu, essarts	abattis peu denses	abattis denses	friches herbeuses	vergers	recrûs, et forêt secondaire	forêt dense	forêt marécageuse	cours d'eau	ombre de nuages
route, bâti, sol nu, essarts	**95,93**	0,69	0,00	0,12	2,35	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
abattis peu denses	0,00	**95,96**	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abattis denses	0,97	0,46	**97,34**	0,23	2,29	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00
friches herbeuses	0,00	2,89	0,00	**98,72**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
vergers	3,10	0,00	1,21	0,00	**95,35**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
recrûs et forêt secondaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**81,78**	10,94	0,02	0,00	0,05
forêt dense	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,94	**87,53**	0,74	0,00	0,77
forêt marécageuse	0,00	0,00	1,45	0,00	0,00	0,06	1,51	**99,16**	0,10	0,02
eau libre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**99,70**	0,00
ombre de nuages	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	**99,16**

Pour illustrer le cas de Maripasoula, nous avons repris la composition colorée de l'image Spot P+Xi de la figure 16 (p. 114) en choisissant les canaux de manière à mettre en évidence la distribution spatiale des différents types d'occupation du sol (canaux 1, 2 et 3). La figure 28 montre une colonisation en auréoles concentriques à partir du fleuve Maroni. Dos tourné au fleuve, le bourg forme la première auréole : c'est l'espace bâti. La seconde est constituée d'abattis et de friches, et la troisième c'est l'auréole de forêt secondaire qui s'éloigne de plus en plus du bourg en grignotant la forêt dense. Ce type d'organisation de l'espace révèle une entame de sédentarisation de la population et rappelle le modèle d'occupation agricole du sol conçu par Von Thünen. Dans ce modèle, la ville occupe la couronne centrale, tandis que les pâturages occupent la périphérie. A Maripasoula, même si le bourg n'est pas situé au centre, il joue un rôle primordial dans l'organisation de l'occupation du sol. C'est à partir du noyau d'habitations que partent les pistes qui conduisent aux abattis, aux jachères et à la forêt périphérique où sont opérés les nouveaux défrichements.

A Saint-Georges de l'Oyapock, l'occupation du sol est organisée autour du fleuve Oyapock et de la rivière Gabaret (fig. 29). Les empreintes anthropiques sont constituées de défrichements agricoles (abattis, vergers, pâturages) et du bâti (pistes et bourgs). Les abattis sont identifiables par les tailles et les formes géométriques des parcelles qui sont disposées en « timbres poste » au sud de la rivière Gabaret. Les friches occupent aussi le même secteur, ce qui dénote de la sédentarisation de la population et de la saturation de l'espace à proximité du bourg.

Ces trois exemples étudiés en Guyane française illustrent la diversité et les similitudes de l'organisation de l'occupation du sol au niveau sous-régional. Les images satellites confirment que les abattis ne sont pas des défrichements de grande ampleur et qu'ils sont réalisés à proximité des points d'ancrage de l'occupation du sol comme les cours d'eau, les routes et les bourgs. Mais cet apport des images est plus ou moins compromis par la forte nébulosité, surtout pour les images acquises

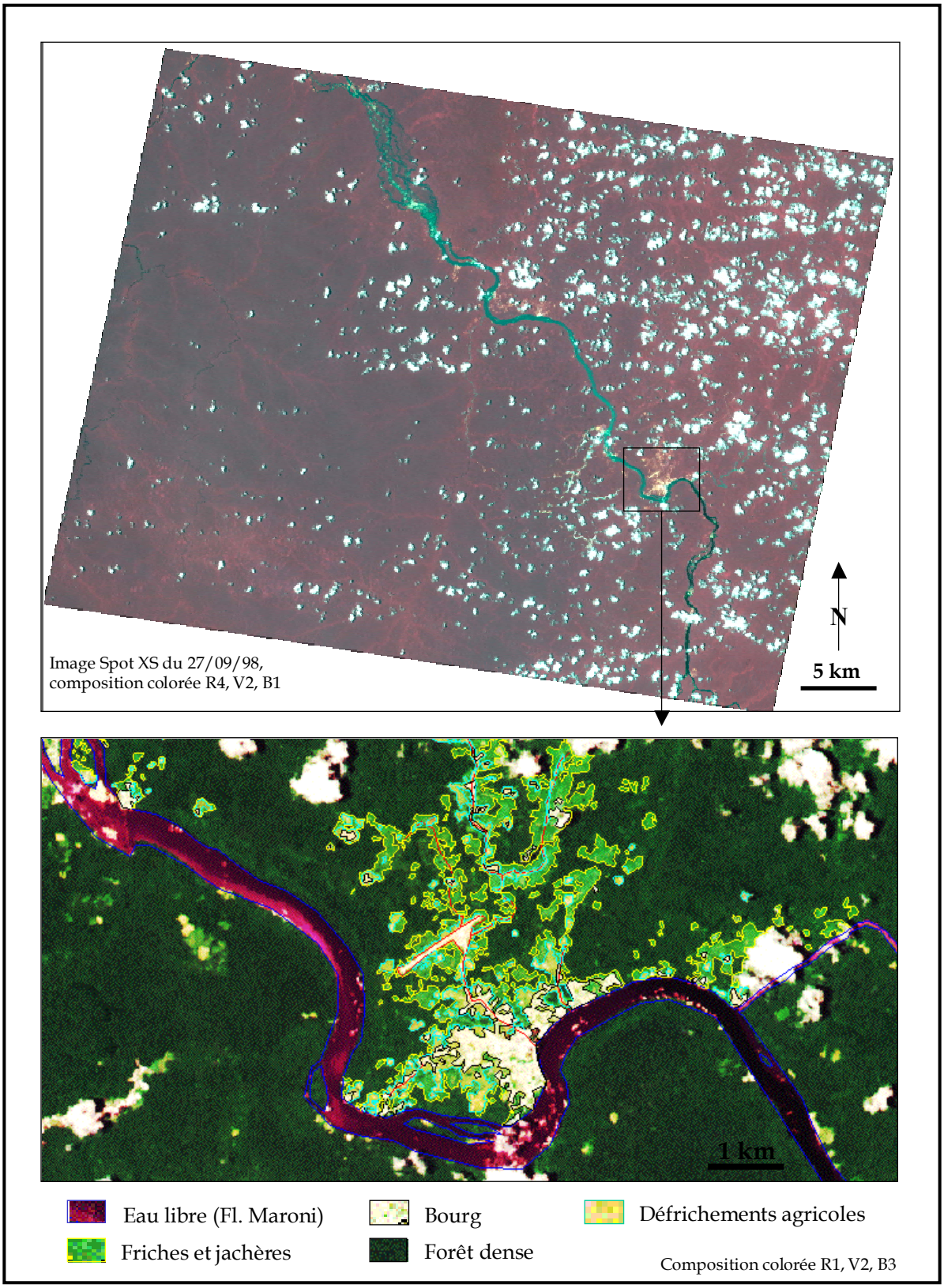
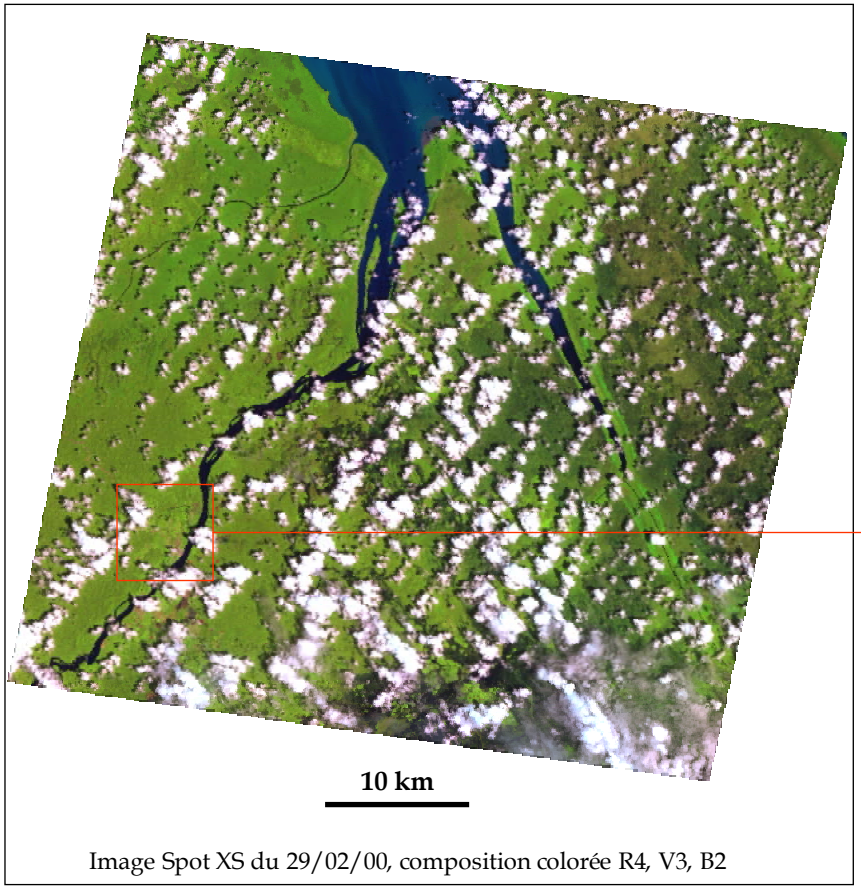


Figure 28. Structuration de l'occupation du sol en auréoles autour du bourg de Maripasoula : Mise en évidence à partir d'une image Spot XS



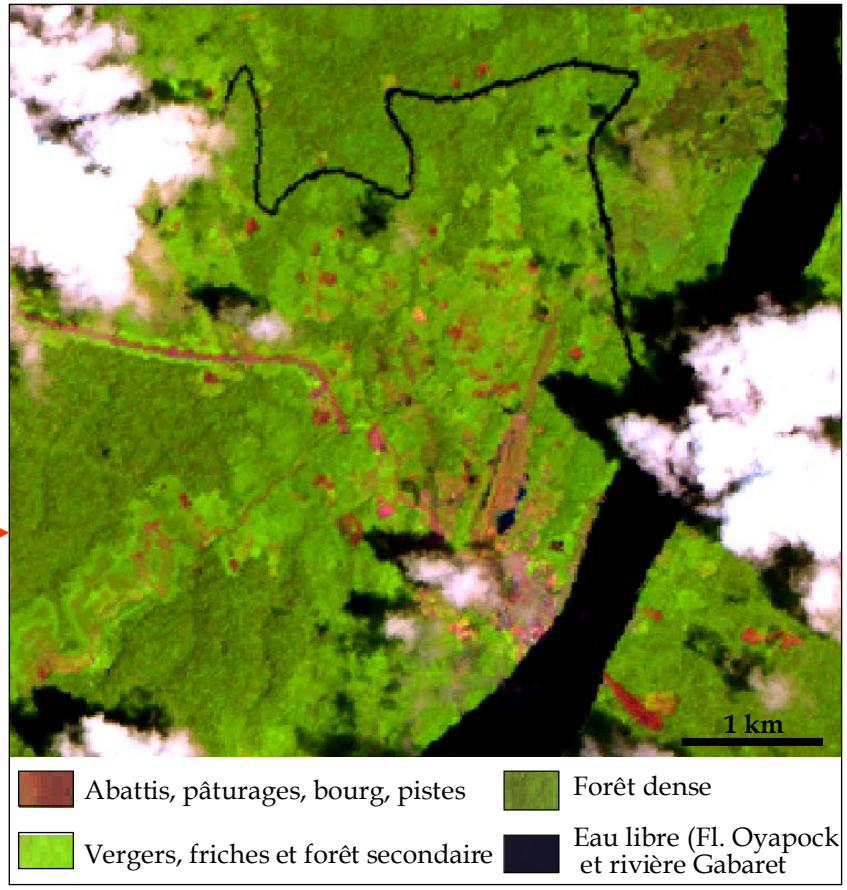


Figure 29. Les défrichements agricoles et l'occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock d'après Spot XS

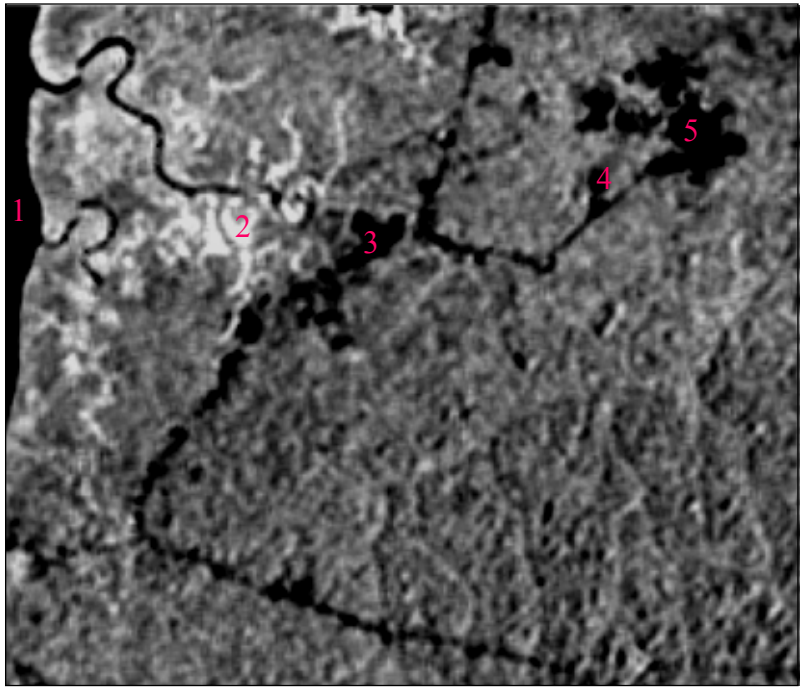
dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge. Face à cette situation, la télédétection radar est peut-être un palliatif pour détecter et identifier les abattis.

II.2.2. L'apport du radar pour la mise en évidence des abattis

L'apport du radar à synthèse d'ouverture pour l'observation des défrichements de type abattis a été testé sur le site de Charvein. Des traitements ont alors été effectués sur deux extraits d'images ERS - 1 (bande C, polarisation VV) et JERS – 1 (bande L, polarisation HH). Après réduction du chatoiement et amélioration du contraste, l'étude des deux documents (fig. 30) montre que l'image JERS permet une meilleure discrimination des couverts végétaux et de l'occupation agricole du sol. En effet, la grande longueur d'onde de JERS (23 cm) favorise la pénétration à travers la canopée (permettant notamment de distinguer si le sous-bois est inondé ou non) et une réflexion quasi spéculaire des parcelles récemment défrichées. Au contraire, la courte longueur d'onde d'ERS (6 cm) entraîne une rétrodiffusion peu différenciée au sommet de la canopée et à la surface des abattis.

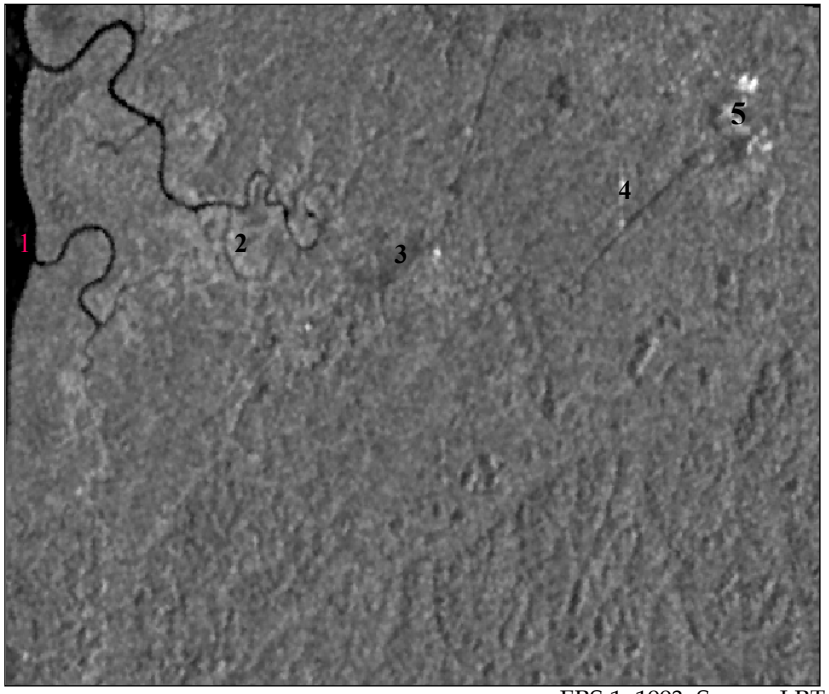
Ainsi, sur l'image ERS, seule la rétrodiffusion des surfaces en eau se différencie nettement de celle des autres composantes de l'occupation du sol. Très faible, cette rétrodiffusion contraste fortement avec celle peu nuancée des formations végétales et des parcelles agricoles. Toutefois, des taches blanches, correspondant au sol nu ou au bâti, sont identifiables, de même que quelques segments de lignes droites qui correspondent aux chemins départementaux.

L'analyse visuelle de l'image JERS permet de repérer d'une manière générale les zones défrichées, qu'elles soient agricoles ou non. Cependant, ce repérage n'autorise pas la distinction entre sols nus, bâti, routes, abattis et autres cultures, car les coefficients de rétrodiffusion de ces surfaces varient peu (fig. 30). De la sorte, il est pratiquement impossible de reconnaître les étapes du calendrier agricole et les différents stades végétatifs des cultures que nous avons décrits dans le chapitre 3 à partir de nos relevés de terrain (cf. planche photos n° 3 , p. 77 et fig. 7, p. 76).



2 km

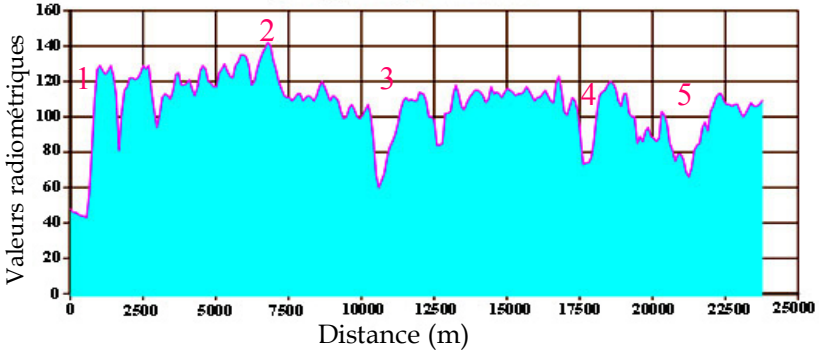
JERS-1, 1995; © NASDA/MITI



2 km

ERS-1, 1993. Source: LRT

Profil de rétrodiffusion, extrait JERS-1



Légende commune aux deux images

1 : eau libre

2 : végétation marécageuse

3 : vergers

4 : bâti

5 : défrichements agricoles, cultures vivrières

Figure 30. Les empreintes anthropiques et les couverts végétaux vus par les capteurs radar : l'exemple du site de Charvein

Pour exploiter davantage le potentiel du radar en vue de caractériser et cartographier les espaces défrichés, plusieurs méthodes ont été proposées : fusion multidate (Rudant et *al.*, 1997), fusion des données radar et des données optiques (Dupas, 2000)[6], interférométrie (Adragna, 1997). Cette dernière technique exploite l'information fournie par la différence de phase entre deux acquisitions proches dans le temps (24 à 48 h). Les produits interférométriques combinent la cohérence et l'amplitude, et sont extrêmement sensibles à la détection de l'occupation anthropique du sol, mais les clés d'interprétation qui ne sont pas clairement établies, font encore l'objet de recherche (Smith et Askne, 2001 ; Strozzi et Wegmüller, 1997).

Les exemples de Charvein, Maripasoula et Saint-Georges, offrent un aperçu des abattis et de l'occupation du sol tels qu'on peut les détecter et les identifier au niveau sous-régional à l'aide d'images satellites à résolution spatiale n'excédant pas quelques dizaines de mètres (typiquement Spot, Landsat TM, radar ERS et JERS) et couvrant au sol des surfaces allant de 60 x 60 km à 185 x 185 km. A ce niveau d'observation, les empreintes spatiales des abattis paraissent relativement discrètes et difficilement séparables des autres marques d'occupation anthropique du sol. Avec les images Spot ou Landsat TM, on se limite à la détection et à la description des périmètres agricoles à l'intérieur desquels on peut discriminer les bassins et les conglomérats d'abattis. Pour identifier, caractériser et cartographier les parcelles d'abattis, l'utilisation d'images à très haute résolution spatiale s'avère indispensable, autorisant ainsi le passage du niveau sous-régional au niveau local.

III. Caractérisation détaillée et cartographie des abattis au niveau local

Compte tenu de la taille des abattis et de l'étroitesse des espaces concernés par cette pratique agricole, la photographie aérienne apparaît comme un outil adapté à l'observation de tels défrichements. D'autres données de très haute

[6] Testée dans le cadre de cette recherche, la fusion image radar – image Spot n'a pas donné de résultats satisfaisants en particulier en ce qui concerne l'identification des types d'occupation agricole du sol et la suppression des nuages sur l'image optique.

résolution (quelques mètres) le sont aussi. C'est le cas d'images Spot 5 qui sont disponibles depuis quelques mois seulement (mai 2002) ; c'est aussi le cas d'images IKONOS. Nous ne disposons pas de ces données récentes dont le coût est encore très élevé en comparaison de celui des images TM et Spot classiques. Le caractère analogique et la grande échelle des photographies aériennes (quelques décimètres à quelques mètres de résolution) conviennent à l'interprétation visuelle (à l'aide d'un stéréoscope) des tirages papiers ou des supports numériques (par photo-interprétation assistée par ordinateur).

A partir des photographies aériennes prises en 1997 sur la commune de Saint-Georges de l'Oyapock (fig. 31), nous avons réalisé un système d'information géographique (SIG) pour inventorier les abattis, les cartographier et quantifier leur emprise spatiale. La figure 17 (p. 117) expose la méthode utilisée (Tsayem, 1999 ; Tsayem et *al*. 2002). Les types d'occupation du sol identifiés par photo-interprétation ont ensuite été complétés et affinés avec les relevés de terrain. Deux classes d'abattis ont été discriminées. La première rassemble les abattis mis en culture en 1997, tandis que la deuxième regroupe les abattis de 1998. Les résultats obtenus sous forme statistique et cartographique apportent des détails précis sur l'emprise spatiale et l'organisation des abattis par rapport au relief, aux bourgs et aux routes.

III.1. La faible emprise spatiale des abattis

Dans le secteur cartographié, 76 abattis ont été mis en culture en 1998, et 44 en 1997, soit au total 120 abattis. Ils occupent une superficie cumulée de 54 ha, ce qui représente moins de 2% de la surface cartographiée qui est de 3231 ha (fig. 32 et tabl. 27). Ces abattis sont essentiellement de petite taille : sur les 76 de 1998, seuls 3 disposent chacun d'une surface légèrement supérieure à 1 ha, celle de chacun des 73 autres (soit 96 % du total) étant inférieure à 1 ha (fig. 33). Pour les abattis de 1997, 37 sur 44 (soit 84 %) disposent d'une surface inférieure à 1 ha, les 8 autres étant comprises entre 1 et 2 ha (fig. 33). Les abattis de moins de 1 ha appartiennent aux *Palikur*, et ceux dont la surface est supérieure à 1 ha sont la propriété des *Saramaka* et des *Créole*. La surface moyenne d'une parcelle d'abattis de 1998 est de 0,39 ha.

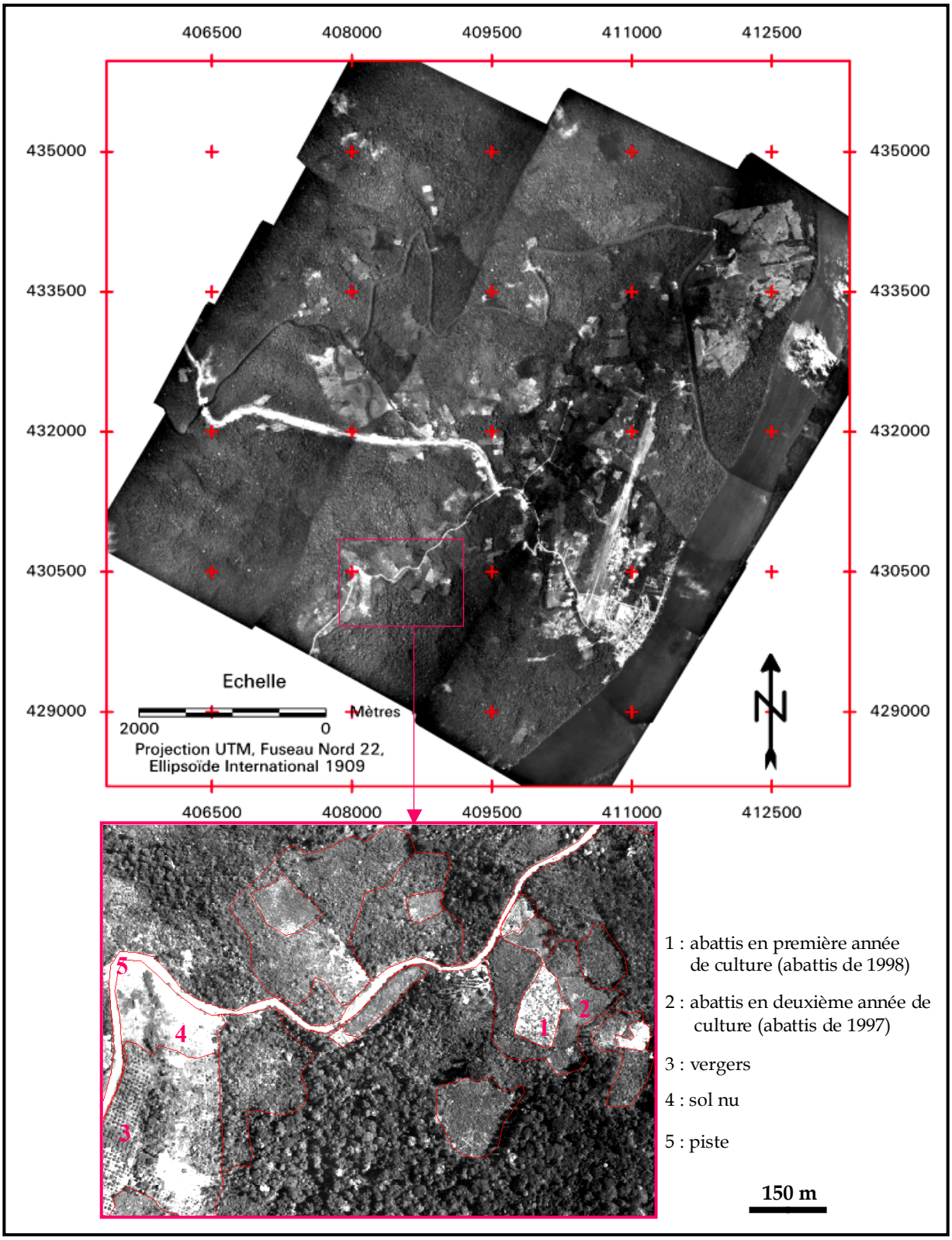


Figure 31. Identification des abattis par interprétation de la mosaïque de photos aériennes de 1997 sur la commune de Saint-Georges de l'Oyapock

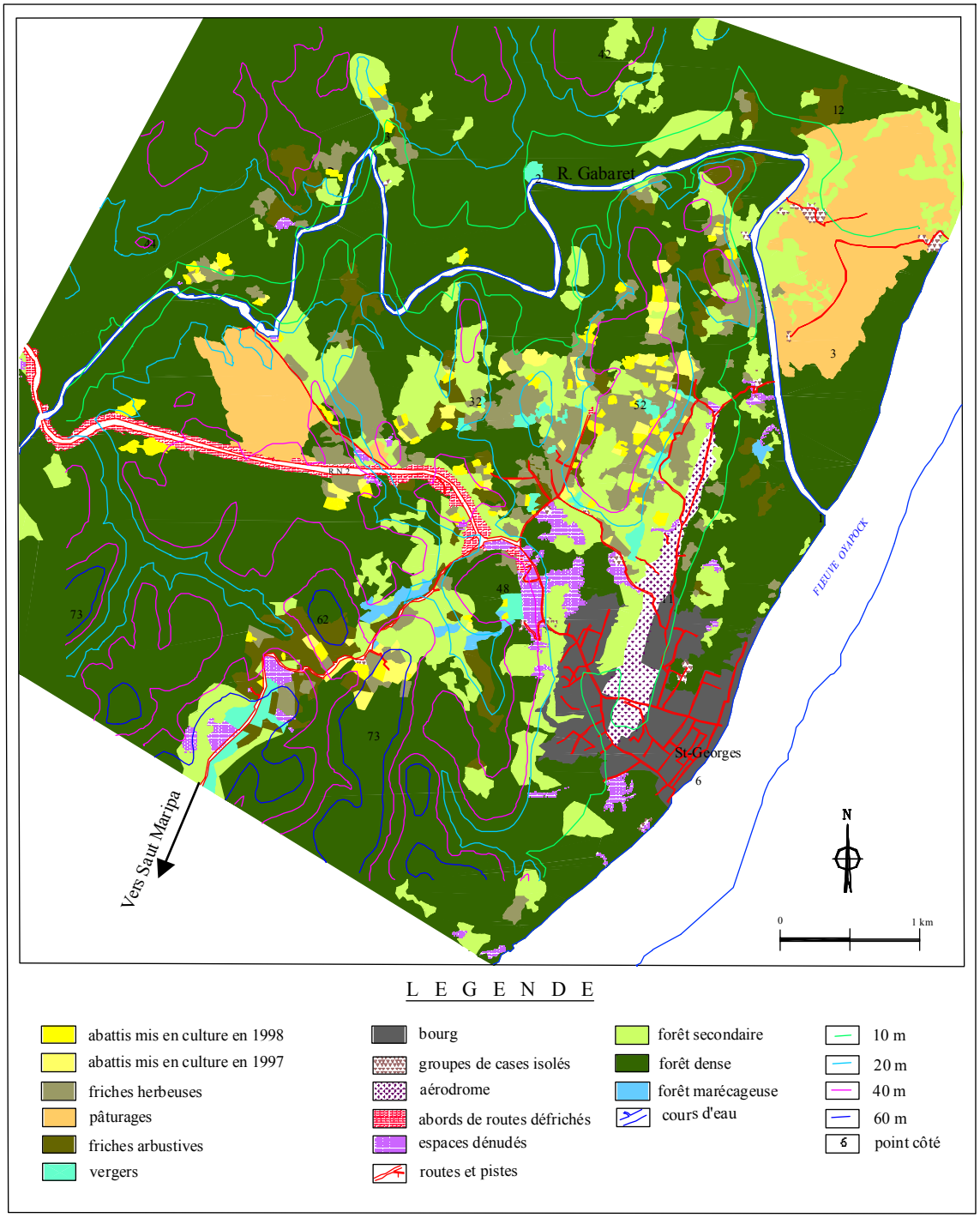
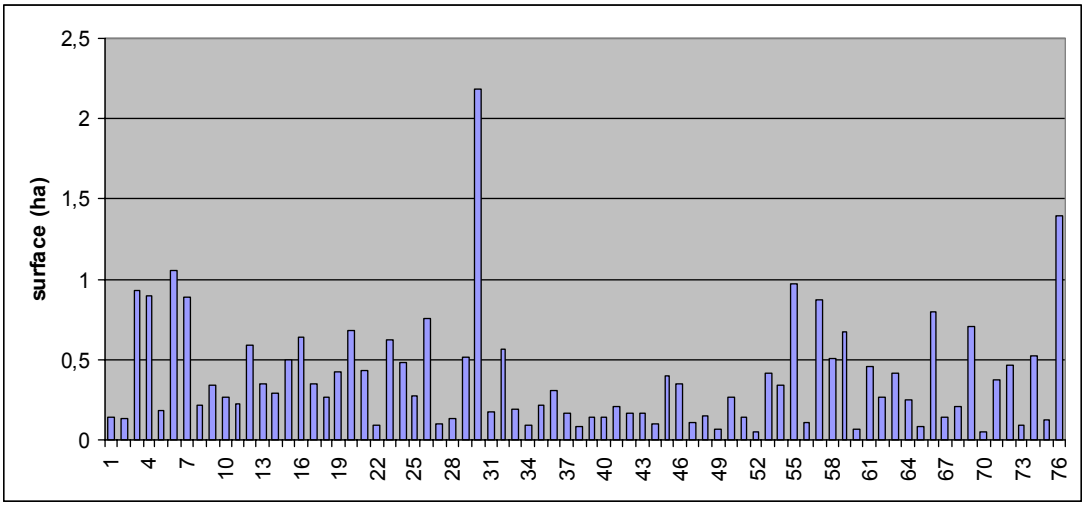
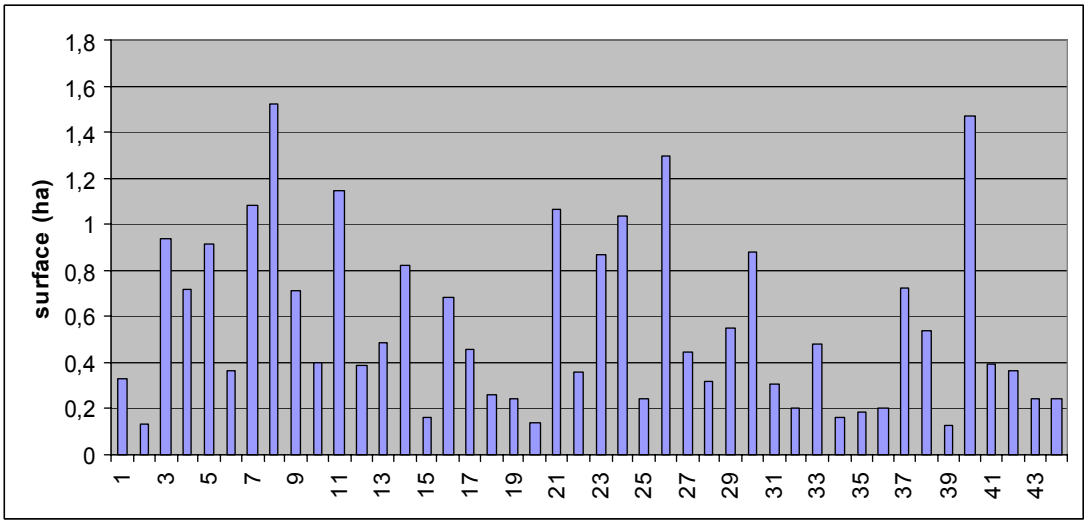


Figure 32. Abattis et occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock : organisation par rapport au relief



a. Abattis de 1998



b. Abattis de 1997

Figure 33. Variabilité de la surface des abattis de 1998 et 1997 à Saint-Georges

Pour l'année 1997, les chiffres indiquent que la surface moyenne de l'abattis est de 0,55 ha. En regroupant les deux classes d'abattis, on obtient une surface moyenne de 0,47 ha.

La légère différence de surfaces entre les deux dates est en partie imputable à la difficulté, voire l'impossibilité de cartographier individuellement certains abattis mis en culture en 1997 et devenus contigus en 1998. Ce constat justifie l'emploi des photographies aériennes (ou de tout autre type de données à très haute résolution spatiale) pour l'approche locale du parcellaire agricole de type abattis (Tsayem, 2002 ; Eden, 1986). Les travaux effectués à partir des données de type Landsat TM ont montré que la résolution spatiale (30 m) de ce capteur ne permet pas de dénombrer des parcelles de moins de 1 ha (Girou et *al*., 1998 ; Sader, 1995). Avec Landsat MSS, la surface minimale détectable varie entre 2,5 et 3 ha (Fotsing, 1998 ; Dwivedi et Ravi Sankar, 1991). Quant à Spot, sa résolution spatiale en mode panchromatique ou en mode P+Xi (10 m) autorise la reconnaissance des secteurs défrichés, avec une discrimination possible des parcelles de surface plus ou moins proche de l'hectare (Tsayem et *al*. 2001).

La variabilité des tailles de parcelles (fig. 33) est en rapport avec la finalité non productiviste de l'agriculture itinérante pratiquée par les populations autochtones des forêts tropicales (Bahuchet et *al*., 2000 ; Civilisations, 1997). Comme nous l'avons indiqué dans les chapitres 2 et 3, chaque famille défriche la surface jugée suffisante pour la production des denrées destinées en priorité à la satisfaction de ses besoins alimentaires. Ce sont les excédents ou surplus de la production qui peuvent être commercialisés.

A partir des statistiques sur les périmètres et les surfaces, nous avons calculé les indices de morcellement qui renseignent sur le degré de fragmentation de l'espace (Bouix, 1998 ; Ducret et Fotsing, 1987). La fragmentation est considérée ici au sens de fragilité des paysages, c'est à dire le degré d'exposition potentielle aux incursions humaines. Cette exposition est fonction de la taille et de la forme de la portion

d'espace considérée. Il est généralement admis que plus un espace est morcelé, plus il est fragmenté et devient fragile. Le tableau 27 montre que les indices de morcellement des abattis sont parmi les plus élevés à Saint-Georges (671 et 580 m/ha). Ces indices révèlent que bien qu'ils soient de petite taille, les abattis contribuent considérablement au morcellement et au mitage des unités spatiales qui les contiennent dans la région de Saint-Georges, ce que montre du reste la figure 32.

Ainsi que le suggèrent nos résultats (tabl. 27), en terme de déforestation, l'impact des petits défrichements agricoles est faible à Saint-Georges de l'Oyapock, comme sans doute dans toute la Guyane. Si on considère que les abattis, les vergers, les pâturages et les friches herbeuses et arbustives font partie de la surface agricole utilisée, on obtient une superficie totale de 516 ha, soit 16 % de la zone cartographiée. En cumulant les surfaces de forêt secondaire et de forêt dense, on obtient une superficie de 2464,4 ha, soit 76 % de la surface cartographiée. Quant à l'emprise urbaine (bourg, aérodrome, espaces dénudés, abords de routes défrichés), elle représente 7,7 % de la zone d'étude (avec 250 ha). Outre la taille des abattis, nous nous sommes intéressés à leur disposition par rapport au relief.

III.2. Distribution des abattis par rapport au relief

La superposition des courbes de niveau de la carte IGN de la région de Saint-Georges sur la carte de l'occupation du sol, permet d'avoir une idée de la répartition des abattis en fonction de l'hypsométrie (fig. 32, p. 153). Le modelé du site cartographié est constitué de petites collines coupées par les vallées des cours d'eau. Les dénivellations ne sont pas importantes. De 73 m au sud-ouest du bourg, le relief s'enfonce progressivement vers le nord-ouest où, au niveau du fleuve Oyapock, les altitudes oscillent entre 1 et 6 m. Les abattis sont situés essentiellement dans la ceinture formée par la courbe de niveau 40 m. Au-delà de cette altitude, on trouve 3 abattis entourés par la courbe de niveau 60 m (à l'ouest de la piste allant à Saut Maripa). Les défrichements agricoles traditionnels se font en priorité sur les secteurs élevés, à l'écart des phénomènes d'hydromorphie qui affectent les bas-fonds. Néanmoins, quelques abattis isolés ont été ouverts à moins de 20 m d'altitude,

principalement aux alentours de la rivière Gabaret. Contrairement aux routes et au bourg, cette rivière semble jouer un rôle négligeable dans la structuration de l'occupation du sol (fig. 32).

III.3. L'effet structurant du bourg et des routes

L'analyse de la distribution spatiale des abattis indique que le bourg de Saint-Georges et les voies de circulation constituent des points d'ancrage à partir desquels s'organise l'occupation de l'espace, et en particulier la colonisation de la forêt environnante. La moitié des abattis mis en culture en 1998 (34 sur 76) est située à une distance qui varie entre 1 et 2 km à partir du centre du bourg, et un tiers (24 sur 76) à moins de 1 km. Pour les abattis de 1997, deux tiers (30 sur 44) sont situés entre 1 et 2 km du bourg. Au total, sur les 120 abattis en cours d'exploitation dans la région en 1998, 53 % sont situés entre 1 et 2 km autour du bourg, et 28 % dans un rayon de moins de 1 km (fig. 34 et tabl. 28). Cet éloignement relatif des abattis est révélateur de la saturation de l'espace autour du bourg, car depuis plusieurs années, l'agriculture itinérante traditionnelle est cantonnée pour l'essentiel dans le même secteur (nord-ouest de la piste d'atterrissage). Outre le bourg lui-même et l'aérodrome qui le jouxte, l'espace est largement occupé actuellement par les friches herbeuses et arbustives dans un rayon de 1 km autour de Saint-Georges, ce qui amène de plus en plus à ouvrir les nouveaux abattis un peu plus loin du village.

L'emplacement des abattis est en rapport avec l'attraction des routes sur l'exploitation agricole du milieu (tabl. 28 et fig. 35). Ainsi, 83 % des abattis mis en culture en 1998 (63 sur 76) sont situés à une distance maximale de 500 m de part et d'autre d'une route ou d'une piste. Cette proportion passe à 58 % pour une distance de 200 m. Des rapports similaires sont observés pour les abattis mis en culture en 1997. Les défrichements essaiment autour des routes et des sentiers, les incursions étant très limitées au-delà de 500 m autour des axes de circulation. Ces résultats confirment le potentiel attractif des routes et des implantations humaines dans l'occurrence des défrichements agricoles en forêt tropicale (Mertens et Lambin, 1997 ; Sader, 1995 ; Eden, 1986).

Tableau 27. Caractéristiques des types d'occupation du sol à Saint-Georges

Types d'occupation du sol	Surface (ha)	%	Périmètre (m)	Indice de morcellement (m/ha)
abattis de 1998	29,6	0,9	19919	671
abattis de 1997	24,5	0,7	14257	580
friches herbeuses	152,1	4,7	68320	448
friches arbustives	101,7	3,1	40940	402
forêts secondaires	365,4	11,3	125406	343
forêts denses	2089,7	64,6	163218	78
forêts marécageuses	9,3	0,2	4591	490
vergers	23,3	0,7	12276	527,2
pâturages	185,3	5,7	48617	262
espaces dénudés	48,2	1,5	23526	488
bourg	115,1	3,6	13359	116
groupes de cases isolés	9,5	0,3	6351	669
aérodrome	38,5	1,2	8211	212
abords de routes défrichés	38,8	1,2	18373	474
total	3231	100	567364	Moy : 176

Tableau 28. Répartition des types d'occupation du sol à Saint-Georges

Types d'occupation du sol	superficie (ha)			
	autour du bourg		autour des routes	
	rayon d'un km	rayon de 2 km	rayon de 200 m	rayon de 500 m
abattis de 1998 (76)	5,8 (24)	20 (58)	15,3 (44)	22,6
abattis de 1996 et 1997(44)	3,5 (9)	22,2 (39)	11 (26)	19
friches herbeuses	35,7	112,7	72	126,7
friches arbustives	14,9	56,2	35,3	62,9
forêt secondaire	123,9	213,7	144	261,1
forêt dense	308,5	709,5	223,9	689,2
forêt marécageuse	3,2	9,3	5,4	9,3
vergers	7,3 (11)	16,3 (28)	18,4 (24)	21,8 (30)
pâturages	/	15	105	168,1
espaces dénudés	32,1	42,1	39,4	45,6
emprise de la route	4,4	13,2	29,7	29,7
aérodrome et son emprise	37,7	38,5	38,6	38,5
groupes de cases isolés	3,1	4,8	8,5	9,2
bourg	115,1	115,1	115	115,1
total	695,2	1388,6	861,5	1618,8

N.B. les chiffres entre parenthèses représentent le nombre de parcelles

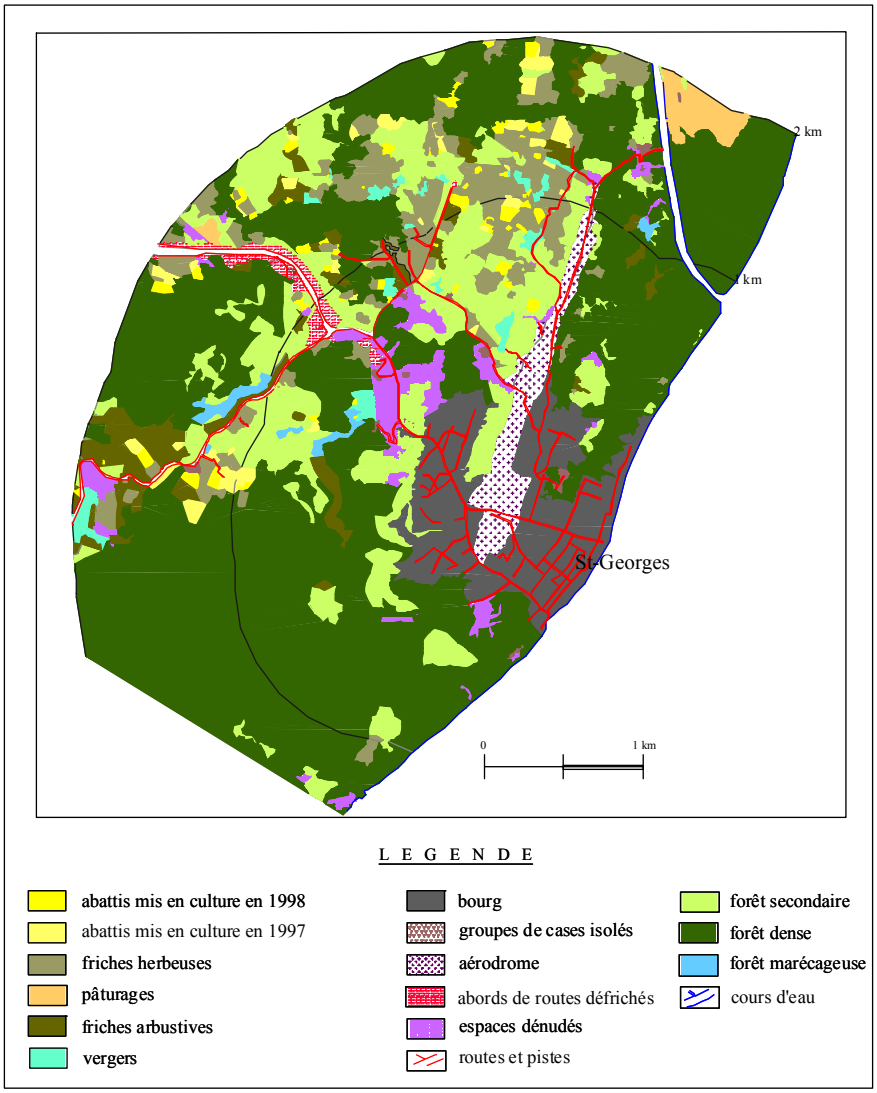


Figure 34. Organisation de l'occupation du sol autour du bourg de Saint-Georges

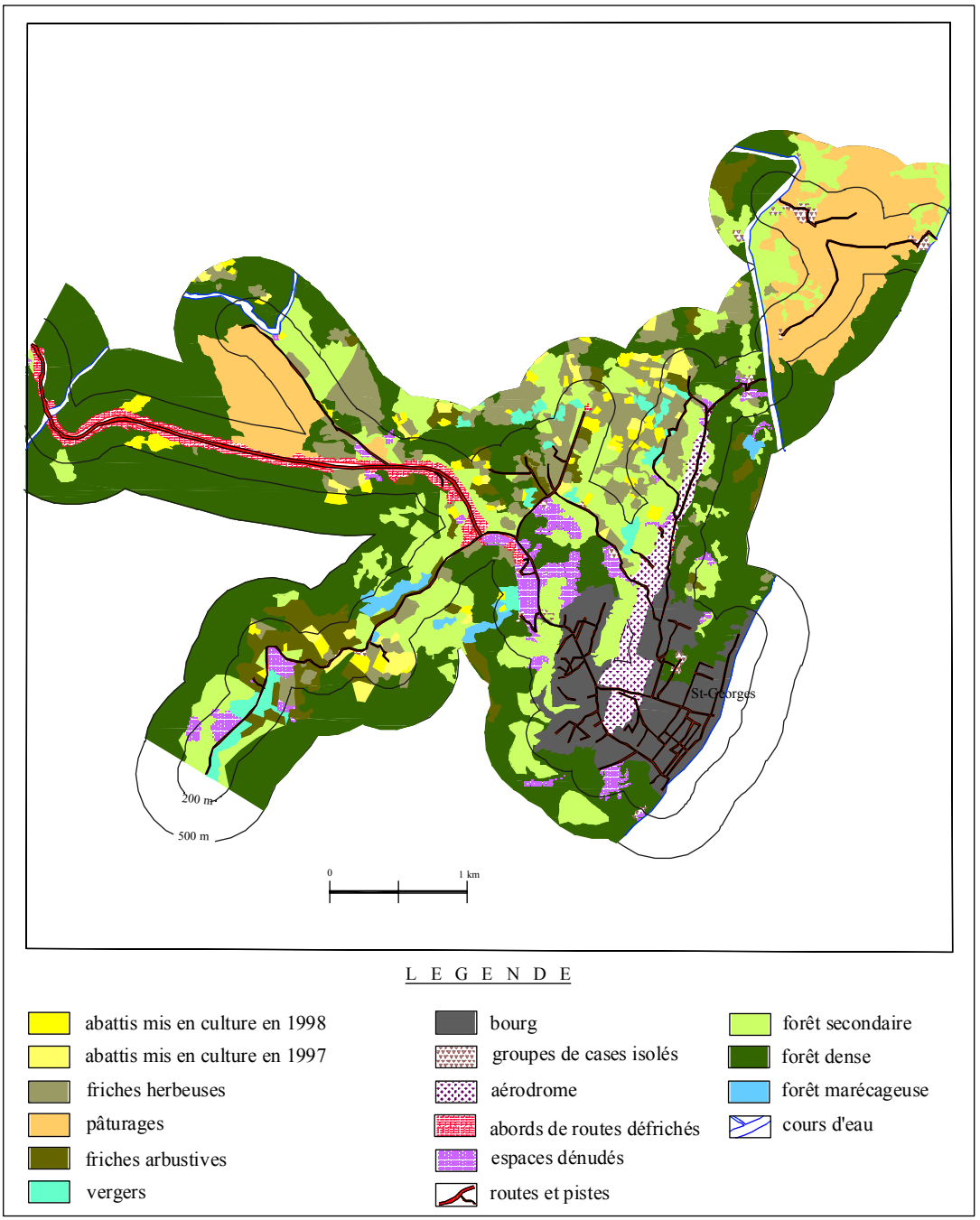


Figure 35. Organisation de l'occupation du sol autour des routes à Saint-Georges de l'Oyapock

Au total, l'utilisation des photographies aériennes permet de caractériser finement les stades végétatifs des cultures à l'échelon local. A ce niveau d'observation, on différencie aisément les types de couverts et il est possible de cartographier avec précision les abattis. Par ailleurs, le SIG se révèle efficace pour l'analyse de la distribution spatiale et la quantification des superficies défrichées et des autres types d'occupation du sol. Enfin, nos résultats confirment que les abattis consomment une infime partie de la forêt et sont localisés de part et d'autre des voies de circulation, près des bourgs et essentiellement sur les parties hautes des interfluves.

Les exemples traités dans ce chapitre révèlent qu'à la variabilité des dimensions spatiales des défrichements agricoles amazoniens, correspond une diversité des capteurs qui permettent de détecter et de décrire ces défrichements aux niveaux appropriés (tabl. 24, p. 105 et fig. 20, p. 131). Les défrichements de grande ampleur (fronts pionniers amazoniens) peuvent être détectés et identifiés au niveau régional à l'aide d'images AVHRR de NOAA et Spot 4 VEGETATION. Les images Landsat et Spot permettent, au niveau sous-régional, de mieux saisir l'agencement des parcelles des fronts pionniers. Les abattis et autres défrichements de faible ampleur sont identifiables sur les images Landsat TM et Spot qui autorisent la cartographie des secteurs défrichés. L'imagerie radar, supposée pallier l'obstacle constituée par la couverture nuageuse qui altère les enregistrements optiques, ne permet pas de distinguer aisément les défrichements agricoles des autres formes d'occupation anthropique de l'espace. Au niveau local, les photographies aériennes s'avèrent propices à l'inventaire et à l'analyse fine de la configuration spatiale des abattis. Une bonne connaissance des échelles spatiales des défrichements, ainsi que des pratiques agricoles mises en œuvre, oriente judicieusement le choix des capteurs. De la sorte, le suivi des défrichements peut être envisagé avec les outils et les méthodes appropriées. Toutefois, pour être efficace, la stratégie de suivi doit tenir compte de l'évolution temporelle des défrichements et des dynamiques d'occupation du sol.

CHAPITRE 6

DYNAMIQUES DES DEFRICHEMENTS AGRICOLES ET D'OCCUPATION DU SOL EN GUYANE FRANÇAISE ET AU BRESIL

L'utilisation des méthodes de détection des changements présentées dans le chapitre 4 va nous permettre de déceler les mutations spatiales liées aux défrichements agricoles en Amazonie. Ces mutations portent sur l'extension ou la réduction de l'emprise spatiale des défrichements et des autres catégories d'occupation du sol. Ainsi, après la détection des changements par télédétection, nous mettrons en évidence les dynamiques d'occupation du sol en recherchant les facteurs qui expliquent et sous-tendent les évolutions constatées. Quelques exemples nous permettrons d'évaluer la part des abattis et des fronts pionniers dans l'évolution de la déforestation en Amazonie.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé l'approche hiérarchique ascendante[1] proposée par Fotsing (1998). Elle permet d'analyser les changements d'occupation du sol d'abord au niveau local, et ensuite aux niveaux sous-régional et régional, en intégrant progressivement les grandes tendances d'évolution des rapports entre les groupes humains et leur milieu. Chaque niveau d'analyse requiert l'utilisation d'images de résolutions spatiales appropriées (fig. 36).

[1] Il s'agit d'un cheminement inverse de la démarche hiérarchique descendante

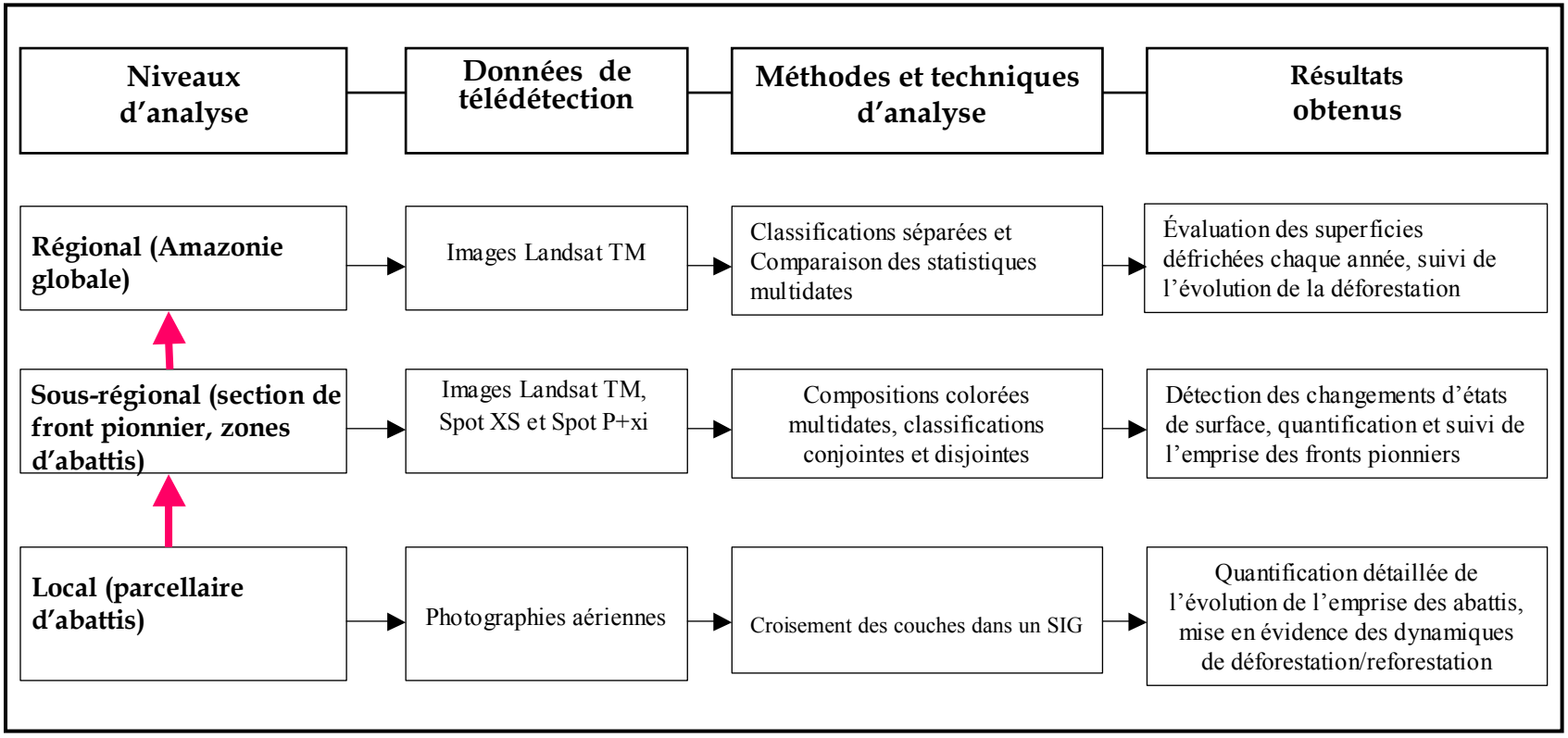


Figure 36. L'approche hiérarchique ascendante pour détecter les changements d'occupation du sol et analyser l'évolution des défrichements agricoles du niveau local au niveau régional

I. Les dynamiques spatiales au niveau local

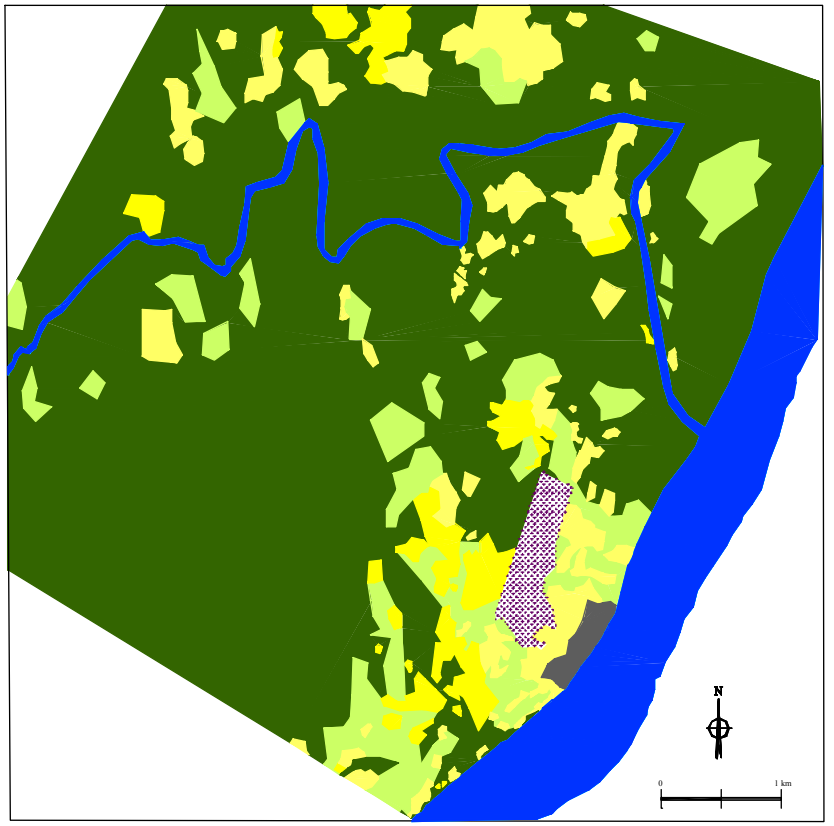
L'analyse des dynamiques spatiales au niveau local concerne le site de Saint-Georges de l'Oyapock pour lequel nous avons élaboré un système d'information géographique avec les photographies aériennes de 1958, 1987 et 1997[2] (fig. 17, p. 117). Elle est conduite à partir des cartes et statistiques issues de l'exploitation de ces photographies aériennes. L'objectif de cette analyse est double : caractériser les mutations survenues dans l'occupation du sol depuis 1958, et analyser les dynamiques de défrichement agricole et/ou de reconquête forestière inhérentes à la pratique des abattis.

I.1. Des mutations spatiales d'une faible ampleur

La carte de l'occupation du sol en 1958 montre que le réseau routier est quasi-inexistant à Saint-Georges qui n'est alors qu'« une enclave de maisons » coincée entre la rive gauche de l'Oyapock et la forêt dense à l'ouest du bourg (fig. 37). De ce fait, les espaces défrichés sont situés essentiellement autour du bourg, avec toutefois quelques parcelles isolées en forêt ou à proximité de la rivière Gabaret. La forêt secondaire, située elle-aussi dans le même rayon et autour de la rivière, témoigne de l'utilisation ancienne de l'espace. En considérant que les parcelles couvertes de végétation herbeuse basse et moyenne étaient des abattis, on obtient une surface agricole de 363 ha en 1958, soit 11 % de la superficie cartographiée, contre 77 % pour la forêt dense (2492 ha, tabl. 29).

La mission aérienne de 1987 ne couvre qu'une étendue de 2486 ha (soit 745 ha de moins que les deux autres), ce qui limite les comparaisons à la zone commune aux trois photographies. Par rapport à la situation de 1958, on note la présence d'un réseau routier embryonnaire en 1987. Il est constitué de sentiers conduisant aux abattis, et de rues qui desservent le bourg, auxquels s'ajoute la route allant à Saut Maripa (sud de Saint-Georges). Construite à partir de 1981, cette route a progressivement attiré de nouveaux défrichements sur ses abords.

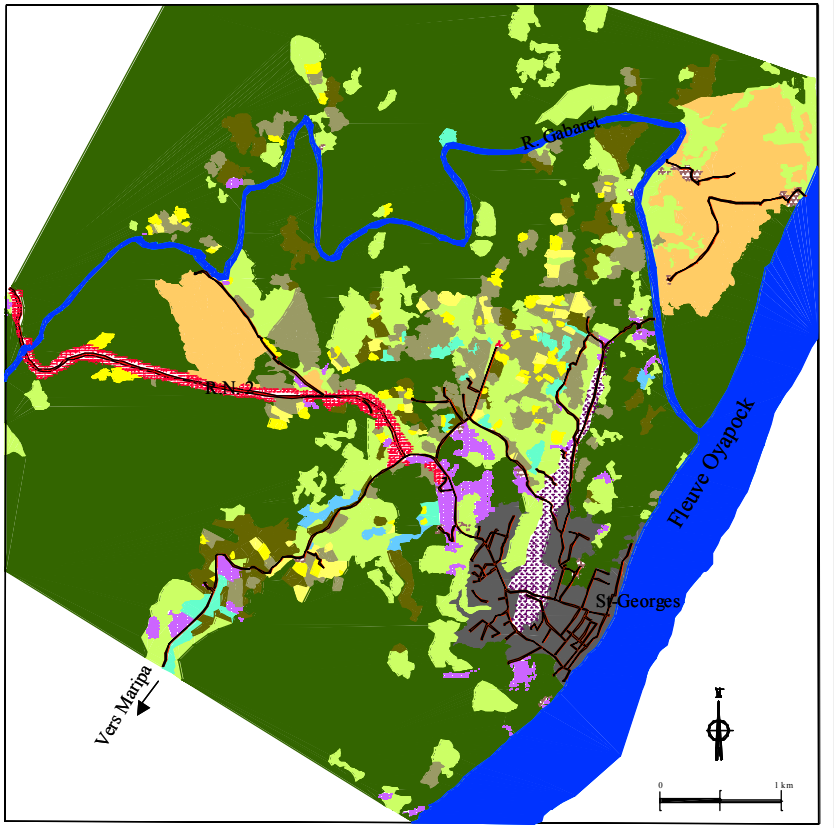
[2] La couverture de 1997 a été actualisée en 1998 à la suite de nos observations de terrain qui ont été elles-aussi réactualisées en 2000 et 2001.



L E G E N D E

parcelles à végétation herbeuse très basse
parcelles à végétation herbeuse moyenne
bourg
aérodrome
forêt secondaire
forêt dense
cours d'eau

a. Situation en 1958



L E G E N D E

abattis mis en culture en 1998
abattis mis en culture entre 1996 et 1997
friches herbeuses
pâturages
friches arbustives
vergers
bourg
groupes de cases isolés
aérodrome
abords de routes défrichés
espaces dénudés
routes et pistes
forêt secondaire
forêt dense
forêt marécageuse
cours d'eau

b. Situation en 1998

Figure 37. Évolution de l'occupation du sol entre 1958 et 1998 à Saint-Georges de l'Oyapock

Entre 1958 et 1987, d'autres types d'utilisation du sol ont fait leur apparition : vergers et pâturages en l'occurrence. Il s'agit là des effets du « plan vert » dont nous avons indiqué dans le chapitre 3 qu'il avait été initié en Guyane française dans les années 1975 avec pour objectif de développer l'agriculture guyanaise par l'incitation à la mise en place d'exploitations agricoles et pastorales. En 1987 à Saint-Georges, on dénombre au total 6 vergers qui occupent une surface de 13,6 ha. Les pâturages occupent 49,6 ha. Par ailleurs, la croissance démographique et « urbaine » se traduit en 1987 par l'apparition de terrains dénudés et de groupes de cases situés en dehors du bourg et dispersés sur la rive gauche du fleuve Oyapock (fig. 38). La surface du bourg est passée de 17 à 74 ha entre 1958 et 1987 (soit une extension de 11 % par an). Dans le même laps de temps, la population est passée de 903 habitants en 1954 à 1199 en 1982 et 1523 en 1990 (soit une augmentation de 1,9 % par an)[3]. Quelques parcelles défrichées en 1958 sont recouvertes de forêt en 1987. C'est le cas de l'aérodrome dont 9 ha sur les marges se sont reforestés entre les deux dates. En effet, lors de sa construction en 1955, la surface déforestée était plus étendue que celle qui a été effectivement occupée par cette infrastructure. La surface agricole (abattis, vergers, friches herbeuses et arbustives, pâturages) est de 344 ha en 1987, soit environ 14 % de l'espace cartographié (fig. 38 et tabl. 30).

En référence à la situation de 1958, l'emprise spatiale de l'agriculture n'a pas significativement évolué à Saint-Georges en 30 ans. La légère diminution des forêts denses en 1987 (qui sont passées de 77 % à 70 %), s'est faite surtout à la faveur de l'extension urbaine et non au profit de l'agriculture.

Les mutations survenues entre 1958 et 1987 se sont poursuivies les années suivantes. Ainsi, l'analyse de l'occupation du sol en 1998 (fig. 37 et tabl. 31) montre que l'ouverture des axes routiers a entraîné l'extension des empreintes humaines dans des secteurs qui étaient encore occupés par la forêt dense en 1958.

[3] D'après l'INSEE-Guyane

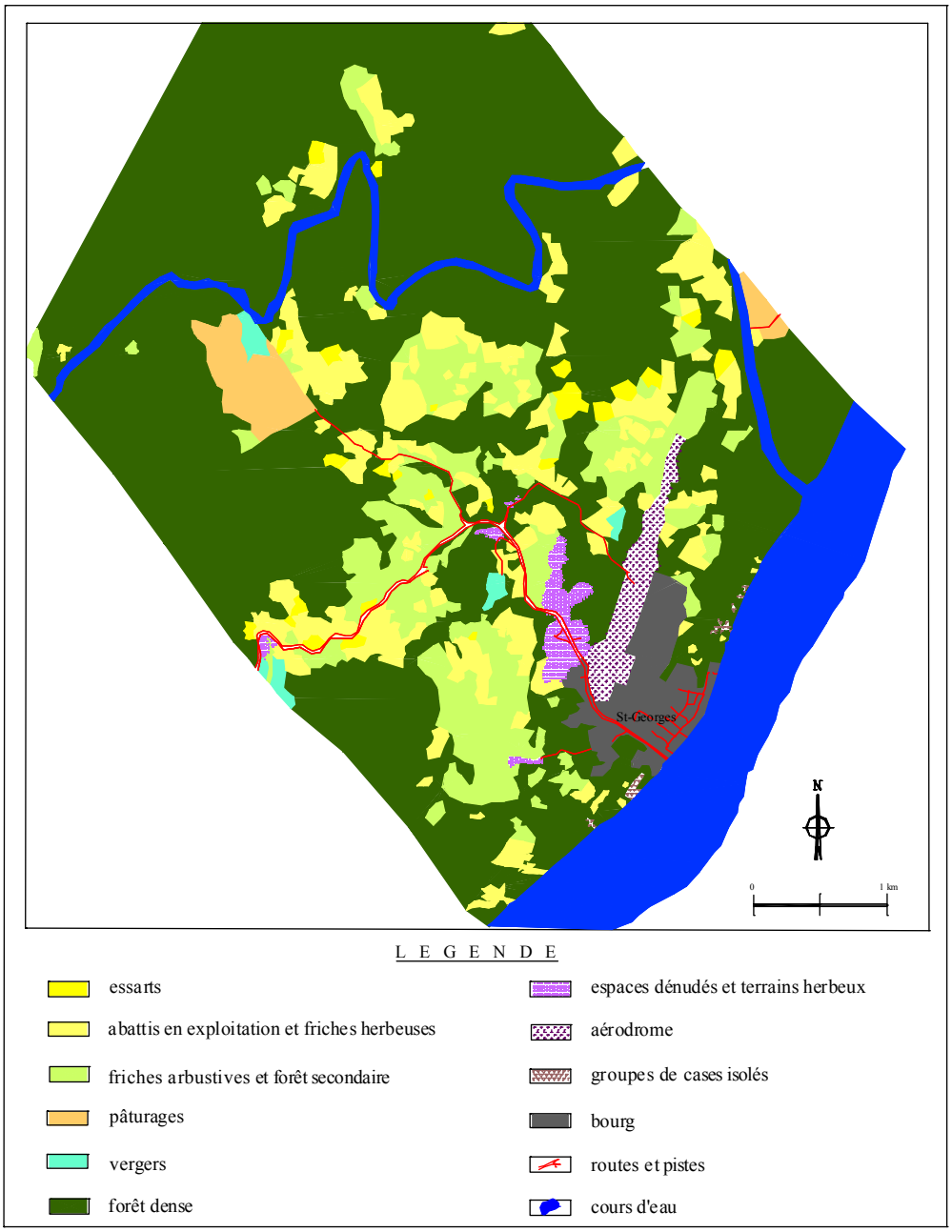


Figure 38. Occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock en 1987

Tableau 29. Surfaces occupées à St- Georges en 1958

Occupation du sol	superficie (ha)	pourcentage
parcelles à végétation herbeuse basse	130,4	4,4
parcelles à végétation herbeuse moyenne	233,4	7,2
forêt secondaire	309,8	9,8
forêt dense	2492,6	77,1
bourg	17,1	0,5
aérodrome	47,7	1,5
total	3231	100

Tableau 30. Surfaces occupées en 1987

Occupation du sol	superficie (ha)	pourcentage
essarts	29,6	1,2
abattis en exploitation et friches herbeuses	251,3	10,1
friches arbustives et forêt secondaire	266,7	10,7
forêt dense	1733,3	69,7
vergers	13,6	0,5
pâturages	49,6	2
espaces dénudés et terrains herbeux	25,5	1
bourg	74,7	3
aérodrome et son emprise	38,6	1,6
groupes de cases isolés	3,1	0,1
total	2486	100

Tableau 31. Surfaces occupées en 1998

Occupation du sol	superficie (ha)	pourcentage
abattis de 1998	29,6	0,9
abattis de 1997	24,5	0,7
friches herbeuses	152,1	4,7
friches arbustives	101,7	3,1
forêts secondaires	365,4	11,3
forêts denses	2089,7	64,6
forêts marécageuses	9,3	0,2
vergers	23,3	0,7
pâturages	185,3	5,7
espaces dénudés	48,2	1,5
bourg	115,1	3,6
groupes de cases isolés	9,5	0,3
aérodrome	38,5	1,2
abords de routes défrichés	38,8	1,2
total	3231	100

Mise à part la route allant à Saut Maripa qui n'existait pas en 1958, le réseau routier de Saint-Georges s'est accru avec la route nationale n°2 dont les travaux de construction ont commencé en 1995. Huit abattis ont été ouverts entre 1996 et 1998 de part et d'autres de cette route. En outre, avec l'augmentation récente de la population de la commune (de 1523 habitants en 1990 à 2088 en 1999, soit une croissance de 37 % en 10 ans d'après les données INSEE)[4], l'habitat n'est plus uniquement concentré dans le bourg. Des groupes de cases isolés sont de plus en plus disséminés principalement le long de l'Oyapock et de la Gabaret (fig. 37).

Malgré la lente mais progressive anthropisation, la forêt dense reste prédominante en 1998, avec près de 2100 ha, soit 65 % de l'étendue cartographiée, contre 77 % en 1958. Il y a donc eu une baisse relative de l'emprise de la forêt entre 1958 et 1998. Mais si on peut l'imputer en partie aux activités agricoles et en particulier aux pâturages et vergers, il n'en demeure pas moins qu'elle est surtout liée à l'accroissement du bourg qui est passé de 17 ha en 1958 à 115 ha en 1998. De 2 % en 1958, l'emprise urbaine atteint 5,7 % en 1987 et 7,7 % en 1998 (tabl. 32). Les défrichements agricoles de type abattis ne sont donc pas la cause principale de la déforestation à Saint-Georges. Ce constat est sans doute généralisable à l'ensemble de la Guyane française, étant donné que les caractéristiques spatiales et les modes de mise en œuvre de ce système agraire traditionnel varient peu d'une localité à l'autre.

Au total, la surface occupée par les forêts dense et secondaire est passée de 2802,4 ha en 1958 à 2464,4 ha en 1998, soit une diminution de 338 ha en 40 ans, c'est à dire en moyenne un taux annuel de déforestation de 0,26 %. La principale mutation dans l'occupation agricole du sol est l'apparition de l'élevage bovin dont les pâturages ont contribué à augmenter l'emprise agricole sur l'espace. Ce sont surtout ces pâturages qui, avec l'extension du bourg, concourent à la déforestation, et non les abattis qui

[4] En raison des difficultés liées au contexte géographique et socio-économique, on considère souvent que les résultats des recensements officiels sont sous-estimés en Guyane française. Ainsi, pour la commune de Saint-Georges, Manusset (1999) évalue le nombre d'habitants à 3204 en 1999, soit une différence de plus de 1100 personnes par rapport au chiffre officiel de 2088 habitants, ce qui signifierait que ce chiffre officiel contient une sous-estimation de 35%.

ont cependant été ouverts sporadiquement çà et là, surtout à la faveur du passage de la route. L'emprise agricole (hormis les parcours de bétail), a varié très peu entre 1958 et 1998, se stabilisant autour de 11% (tabl. 32).

Tableau 32. Evolution des superficies des types d'occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock entre 1958 et 1998

occupation du sol	1958		1987		1998	
	ha	%	**ha**	%	**ha**	%
agricole	363,8	11,2	294,5	11,8	331,2	10,2
urbain	64,8	2	141,9	5,7	250,1	7,7
forêts	2802,4	86,7	2000	80,4	2464,4	76,2
pâturages	/	/	49,6	2	185,3	5,7

Le pourcentage de déforestation autour de Saint-Georges paraît faible. Mais il n'est pas très disproportionné par rapport à ceux trouvés dans des contextes démographiques et géographiques comparables. Dans la forêt dense à l'Est du Cameroun, Mertens et Lambin (1997) rapportent un taux de déforestation annuelle de 0,5 %[5]. D'après ces auteurs, cette déforestation est à 84 % le fait des défrichements agricoles. Des recherches récentes montrent que lorsque les pressions agricoles augmentent suite à une hausse de la demande en produits vivriers, ou à une modification des pratiques culturales et des structures démographiques et foncières, il s'en suit un accroissement du rythme de déforestation (Moizo, 2000 ; N'Guessan, 1993). Toutefois, au vu de nos résultats sur Saint-Georges, il convient de relativiser la part de l'agriculture itinérante traditionnelle sur la déforestation au niveau local, surtout si elle est pratiquée par des groupes ethniques autochtones et ce, dans le contexte socio-économique et suivant les techniques agraires qui la caractérisent (Bahuchet et *al.*, 2000 ; Rossi, 1999 ; Verdeaux, 1999 ; Dufumier, 1996 ; Grenand F., 1996). Les études agro-écologiques et anthropologiques mettent en évidence le rôle des pratiques agricoles traditionnelles dans le maintien ou la reconstitution de la diversité des espèces végétales en milieu forestier tropical (Michon et Bouamrane,

[5] Précisons toutefois que ce chiffre découle des calculs effectués sur les images Landsat TM, et non sur les photographies aériennes.

2000 ; Michon et *al.*, 1995). Ces études montrent que de telles pratiques agricoles induisent des dynamiques spatiales liées au caractère itinérant des défrichements et au phénomène de recrûs forestiers post-culturaux consécutifs à la mise en jachère des parcelles en fin d'exploitation.

I.2. Agriculture itinérante, forêt sur place

Pour mettre en évidence les dynamiques spatiales qui ont cours dans la localité de Saint-Georges depuis 1958, nous avons utilisé les options offertes par le système d'information géographique (intersection de topologies) pour établir une carte de synthèse et produire des statistiques séquentielles (fig. 39 et tabl. 33). La typologie adoptée pour établir la carte chrono-séquentielle a été simplifiée par rapport à celle des autres cartes. Ainsi, le terme forêt désigne à la fois forêt dense et forêt secondaire, urbain renvoie au bourg et à l'aérodrome, tandis qu'agricole fait référence aux abattis, aux friches et aux pâturages. Trois types de dynamiques ont ainsi été définies et cartographiées :

- **Les invariants ou la « dynamique stagnante »**

Il s'agit des types d'occupation du sol ayant la même assise spatiale à la fois en 1958 et en 1998. Autrement dit, ce sont des espaces dont le type d'utilisation est le même aux deux dates : parcelles occupées par la forêt, espace constituant le bourg, parcelles agricoles et cours d'eau. On relève que 2159 ha déjà occupés par la forêt en 1958 le sont toujours en 1998, soit une superficie représentant 67,5 % de la zone d'étude et 77 % de l'aire forestière de 1958, ce qui indique l'immuabilité relative du couvert forestier (tabl. 33). Parallèlement, seuls 36 des 363 ha qui étaient défrichés en 1958 conservent un usage agricole en 1998, ce qui ne représente que 1 % de la surface cartographiée, traduisant ainsi l'instabilité spatiale ou la forte errance agraire.

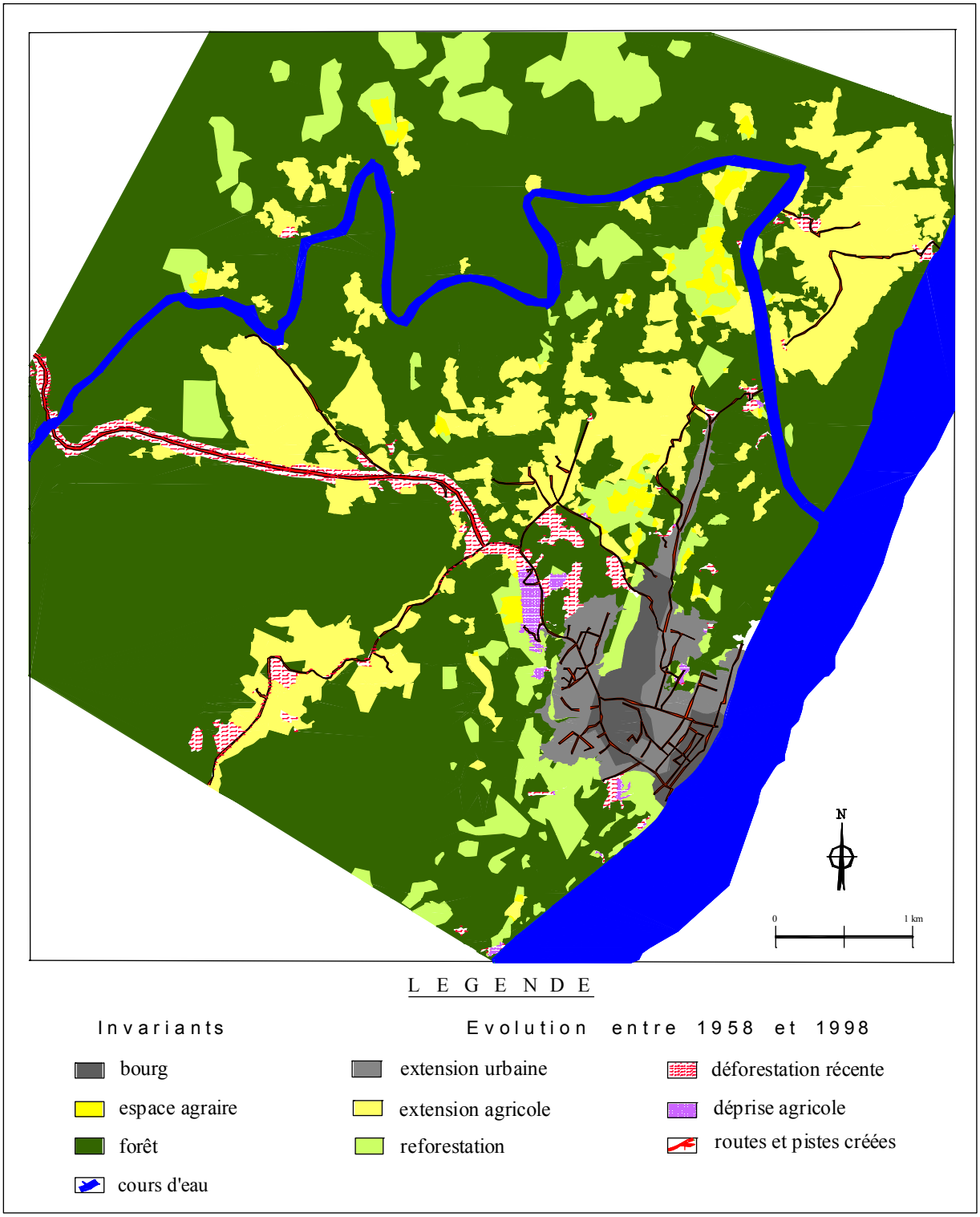


Figure 39. Dynamiques spatiales à Saint-Georges de l'Oyapock entre 1958 et 1998

- **La dynamique régressive**

Elle caractérise la diminution des surfaces de quelques types d'occupation du sol : forêt détruite récemment lors de la construction de la route nationale n°2, déprise agricole (parcelles qui ont perdu leur vocation agricole; elles étaient défrichées en 1958 et en 1998 elles ne sont plus que des espaces dénudés à usage non agricole). Ce type de dynamique affecte des surfaces peu importantes (tabl. 33, fig. 39).

- **La dynamique évolutive ou progressive**

Il s'agit de l'extension de l'emprise spatiale de certains types d'occupation du sol : extensions agricole et urbaine essentiellement aux dépens de la forêt, extension de la forêt elle-même (parcelles défrichées en 1958 et recouvertes de forêt en 1998). L'extension agricole a concerné 480 ha, tandis que 273 ha qui étaient défrichés en 1958 ont par la suite été à nouveau colonisés par la forêt. Ainsi, pendant que l'espace forestier est converti à certains endroits en espaces agricole et urbain, il gagne parallèlement du terrain à d'autres endroits, par reconstitution du couvert arboré après exploitation et abandon des abattis en jachère, d'où la stagnation relative de l'étendue forestière.

Tableau 33. Ampleur des dynamiques spatiales à Saint-Georges entre 1958 et 1998

	Types de dynamiques	superficie (ha)	pourcentage
1	espace demeuré forestier	2158,7	67,5
	espace demeuré "urbain"	54,7	1,7
	espace demeuré agricole	36	1,1
2	extension urbaine	112,1	3,4
	extension agricole	480,1	15
	reforestation	273,5	8,6
3	déforestation récente	81,9	2,6
	déprise agricole	13,6	0,4

1 : dynamiques stagnantes ; 2 : dynamiques évolutives ; 3 : dynamiques régressives.

Cette situation est à mettre en rapport avec les données socio-économiques et les caractéristiques agronomiques du système de défriche-brûlis dans cette région relativement enclavée qui compte près de 200 actifs agricoles[6]. En 50 ans, c'est à dire entre 1950 et aujourd'hui, la population de la commune a simplement doublé, passant de près de 1000 à 2088 habitants d'après les chiffres officiels. La densité démographique demeure faible, avec 1 habitant au km². Cette donnée est peu significative, car l'espace de vie n'est pas toute l'étendue de la commune, mais seulement le bourg et ses environs immédiats. Du bourg, la population va dans la forêt environnante pour défricher des parcelles et y planter principalement du manioc. Les abattis ainsi ouverts sont dispersés mais généralement séparés les uns des autres par des portions de forêt dense, ce qui est de nature à faciliter la reconquête forestière par dissémination des diaspores des arbres sur les parcelles antérieurement défrichées. Après la récolte qui intervient un, deux ou trois ans après la mise en culture, les abattis sont ensuite laissés en jachère et passent successivement du stade de friches herbeuses puis arborées, au stade de forêts secondaire puis dense (cf. planche photo n° 3, p. 77 et chap. 3).

Ce processus a été étudié par Lescure (1986) qui a relevé que la reconstitution du couvert arborescent après agriculture traditionnelle sur brûlis nécessite une centaine d'années chez les Amérindiens *wayâpi* du Haut Oyapock. Dix ans après la mise en jachère, l'ancienne parcelle cultivée est conquise par une forêt secondaire relativement claire. Elle succède à la végétation broussailleuse qui s'installe dans les abattis dès qu'intervient la jachère. La germination se fait essentiellement à partir d'espèces pionnières du genre *Inga* et *Cecropia sp*. En 6 mois de jachère, la hauteur moyenne des adventices augmente de 2 m sur les parcelles d'abattis[7]. Toutefois, il apparaît que la reconstitution du stock floristique initial nécessite une jachère ininterrompue de plus de cent ans.

[6] D'après le dernier recensement agricole effectué en 2000 par la DAF de Guyane.
[7] D'après Pignal (communication au séminaire de restitution du programme SOFT en mai 2002 à Rémire-Montjoly), à paraître dans le rapport final du programme.

Au rythme actuel, les perspectives d'évolution de l'occupation du sol à Saint-Georges ne semblent pas préoccupantes dans l'optique d'une déforestation que pourrait provoquer la pratique des abattis. Cet exemple montre comment les données à très haute résolution spatiale peuvent être utilisées pour identifier et analyser les dynamiques locales de défrichement et d'occupation du sol. Il souligne la complexité des processus de déforestation et de reforestation dans le cadre de l'agriculture traditionnelle itinérante. Comment ces processus se présentent-ils au niveau sous-régional ?

II. Mise en évidence de l'évolution des défrichements agricoles au niveau sous-régional

Au niveau scalaire sous-régional, nous avons eu recours aux images Landsat et Spot pour caractériser l'évolution de l'emprise spatiale des types d'occupation du sol en générale et celle des abattis et des fronts pionniers en particulier. L'étude a porté sur les « sous-régions » du Nord-Ouest de la Guyane (Charvein) et du Nord de l'Etat brésilien du Para (est d'Itaituba) pour lesquelles nous disposons d'images de dates différentes.

II.1. Evolution de l'emprise spatiale des abattis

Les données utilisées pour cette analyse sont une image MSS acquise le 23 juillet 1987, une image Landsat TM du 22 septembre 1992 et une image Spot Xi du 26 novembre 1999. La combinaison associant le canal MSS 4 en rouge, le canal TM5 en vert et le canal Xi4 en bleu, offre une composition colorée qui montre l'évolution des défrichements à Charvein entre 1987 et 1999 (fig. 40). Les défrichements de 1987 qui subsistent en 1992 et en 1999 sont en blanc, tandis qu'en jaune figurent les défrichements de 1992 encore en place en 1999. Les défrichements de 1999 sont en vert. Les empreintes anthropiques s'organisent autour des routes qui constituent le point d'ancrage et d'extension de l'utilisation du sol. Ainsi, les parcelles les plus anciennement défrichées se situent en bordure immédiate des routes et la progression spatiale des défrichements se fait de la route vers la forêt dense.

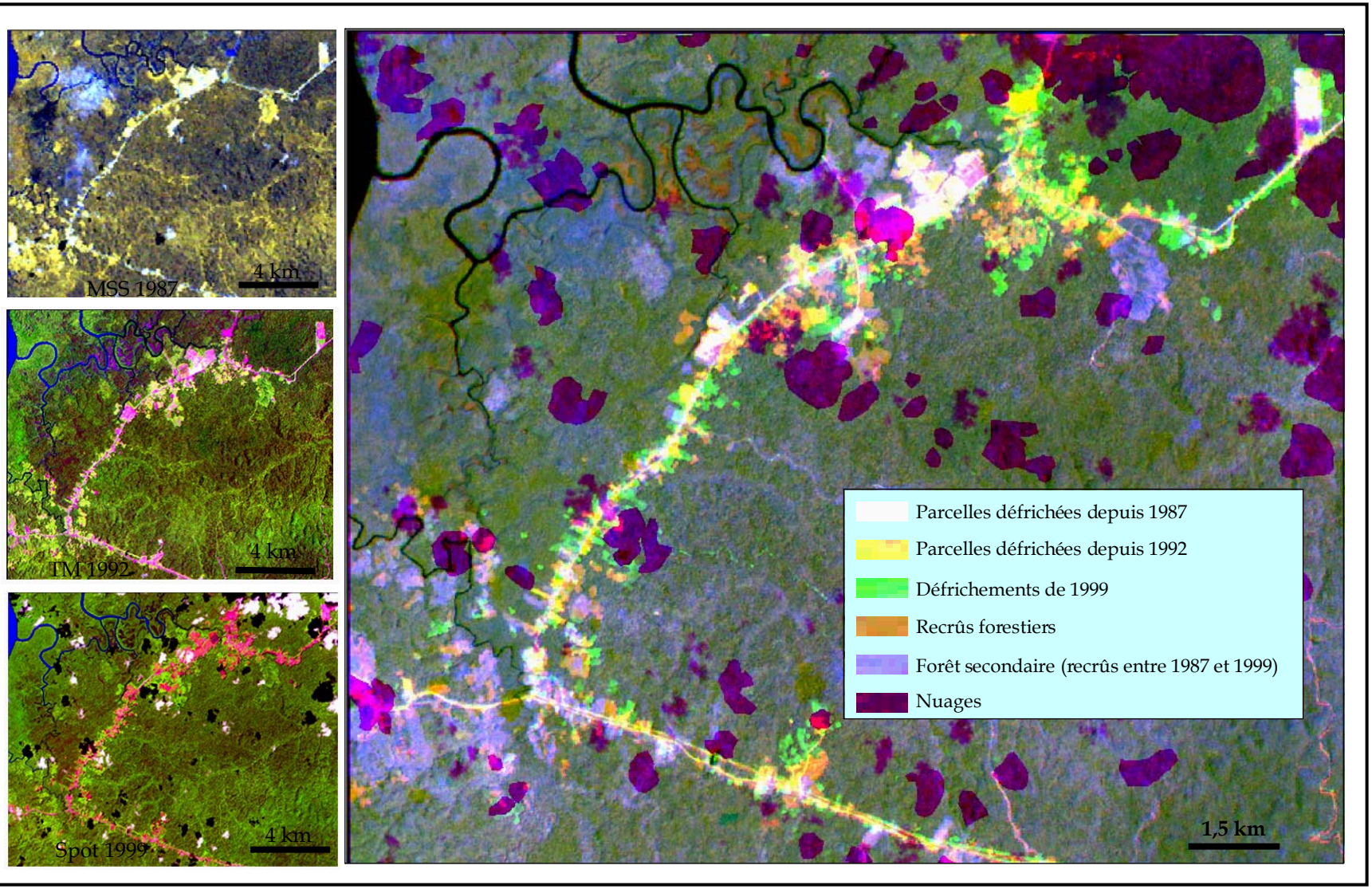
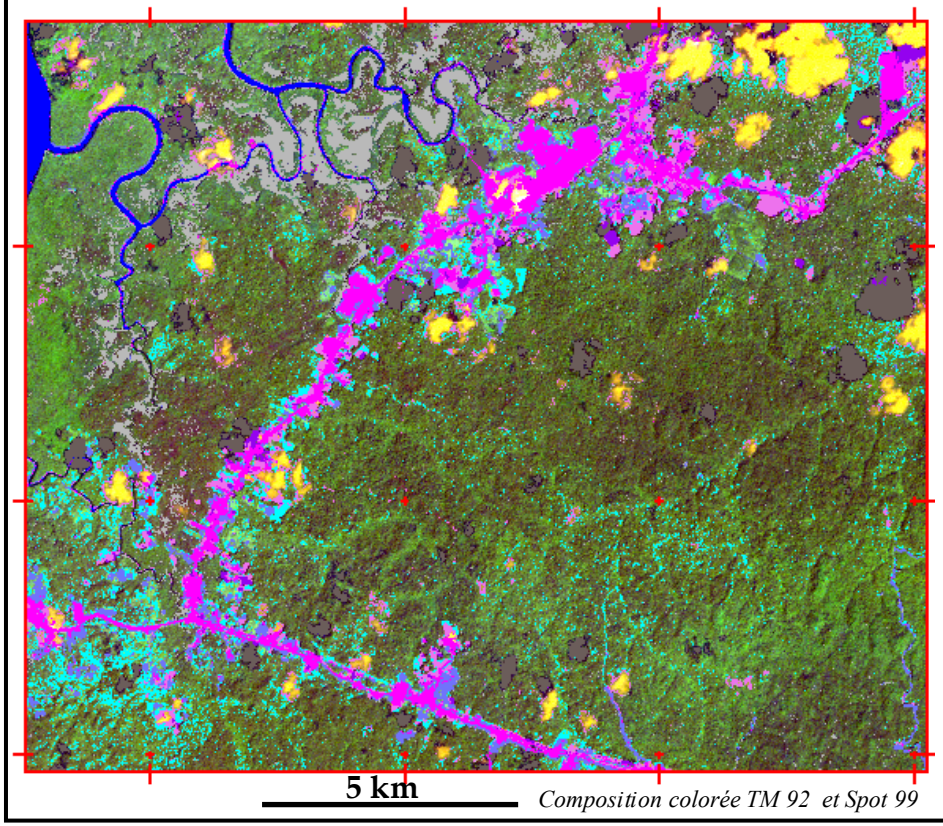


Figure 40. L'évolution des défrichements agricoles entre 1987 et 1999 à Charvein : mise en évidence à partir d'une composition colorée multidate d'images MSS, TM et Spot XS

Les défrichements de 1987 dont les traces perdurent, sont des surfaces caractérisées par une très faible variation phénologique dans le temps : routes, sols nus et bâti. Quant aux défrichements récents, ils sont constitués d'abattis mis en place en 1992 et en 1999. Ces abattis sont situés à proximité de la forêt dense. Entre ces trois « générations » de défrichements, on observe des états de surface en orange et en violet (fig. 40) ; ce sont des jachères, c'est à dire des abattis en cours de reconquête par une végétation qui va devenir progressivement une forêt secondaire.

Pour quantifier l'évolution récente de l'occupation du sol, nous avons effectué une classification conjointe de la composition colorée associant l'image TM de 1992 et l'image Spot de 1999 (fig. 18, p. 122). Les résultats (fig. 41 et tableau associé) montrent que les défrichements agricoles en 1999 grignotent 3,6 % de la surface forestière de 1992, soit une déforestation portant sur 919 ha. Les statistiques qui découlent de la classification indiquent que les parcelles qui étaient défrichées en 1992 et qui sont devenues des recrûs forestiers en 1999, représentent 4,6 % du secteur étudié. Par ailleurs, on relève que 642 ha de sols nus en 1992 (terrains vagues, abords de routes, pistes) sont devenus des friches herbeuses en 1999. Ces observations confirment que la jachère est une pratique inhérente à l'agriculture traditionnelle. Toutes ces mutations spatiales sont localisées le long des axes routiers. Une surface représentant près de 90 % de la zone d'étude n'a subi aucun changement (zone invariante). Puisque cette surface est recouverte essentiellement de forêt (fig. 40), nos résultats démontrent qu'à Charvein comme à Saint-Georges, la forêt stagne et les abattis n'en consomment qu'une infime étendue. Qu'en est-il des fronts pionniers en Amazonie brésilienne ?



Dynamique spatiale	Surf (ha)	%
Forêt en 1992, abattis denses en 1999	757,6	3
Forêt en 1992, abattis peu denses en 1999	161,6	0,6
Défrichements en 1992, recrûs en 1999	1206,3	4,6
Sols nus en 1992, friches herbeuses en 1999	642,6	2,5
Stabilité spatiale (invariants)		
Défrichements en 1992, en l'état en 1999	944,5	3,6
Végétation marécageuse aux deux dates	1147,7	4,3
Forêt demeurée secondaire	7026,1	27
Forêt demeurée dense	12090,1	46
Cours d'eau	245	0,9
Nuages	1269,5	4,8
Ombres de nuages	666,6	2,5
Total	**26157**	**100**

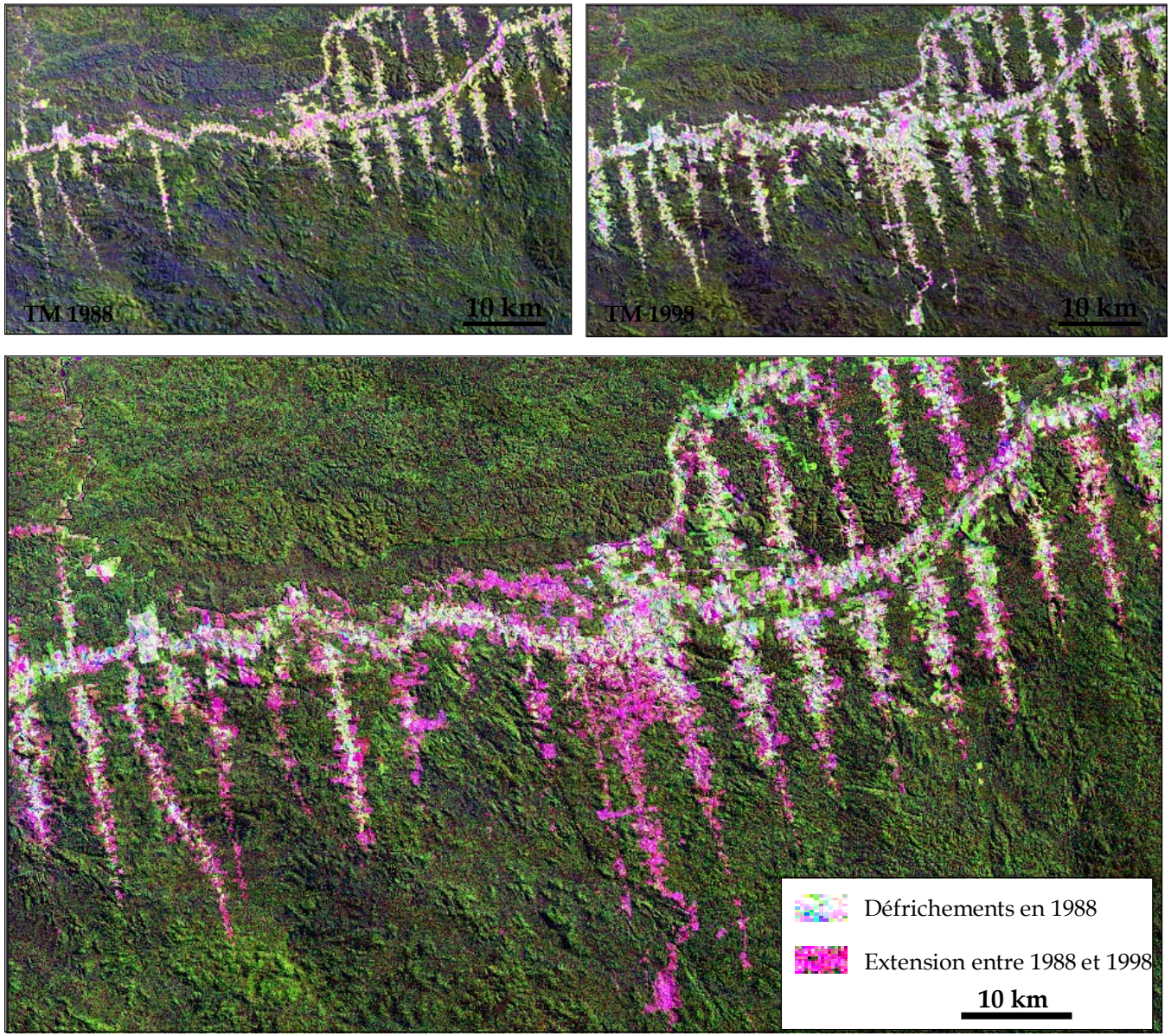
Figure 41. Classification conjointe de deux images (TM et Spot XS) pour quantifier l'évolution des défrichements entre 1992 et 199 à Charvein

II.2. Evolution des fronts pionniers

Nous avons appliqué les méthodes de détection des changements sur deux extraits d'images Landsat TM pour observer l'évolution des défrichements agricoles en Amazonie brésilienne. Ces deux images ont été acquises respectivement le 12 juin 1988 et le 18 juillet 1998. Ce sont les mêmes images que nous avons utilisées dans les chapitres 4 (fig. 19, 124) et 5 (fig. 24, p. 138). Elles couvrent la « sous-région » située au sud de Santarem et à l'est d'Itaituba dans l'Etat du Para au Brésil (cf. fig. 23, p. 137). La réalisation d'une composition colorée associant les canaux TM 5 de 1998 en rouge, TM 5 de 1988 en vert et à nouveau TM 5 de 1998 mais en bleu, permet d'obtenir une image multidate qui montre la progression des fronts pionniers (fig. 42). Les nouveaux défrichements, c'est à dire les parcelles qui n'étaient pas défrichées en 1988 (elles faisaient partie de la forêt à cette date) sont en rose. Ils se situent à la périphérie des défrichements de 1988, mettant ainsi en évidence l'excroissance spatiale des fronts pionniers.

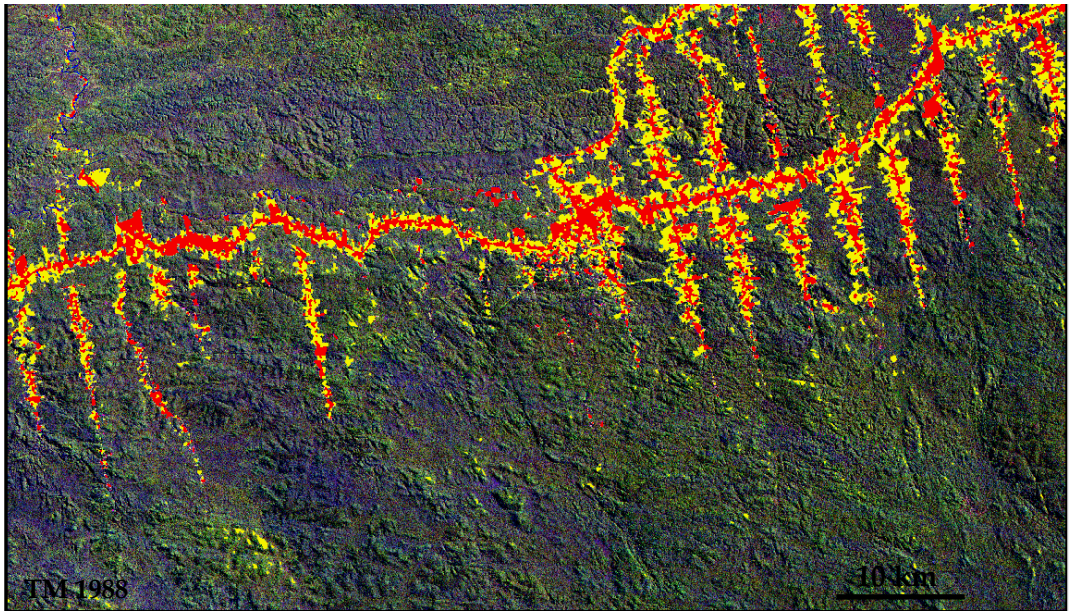
Cette composition colorée multidate montre que les états de surface des fronts pionniers sont relativement homogènes et que leur phénologie varie peu d'une année à l'autre (fig.42). La superposition des canaux du moyen infrarouge permet de relever que les défrichements de 1988 demeurent en place en 1998, ce qui suggère qu'il n'y a pas eu jachère et reprise forestière entre les deux dates. Cette observation confirme que les fronts pionniers sont des défrichements quasi-définitifs et permanents qui laissent peu de possibilité de reconquête forestière.

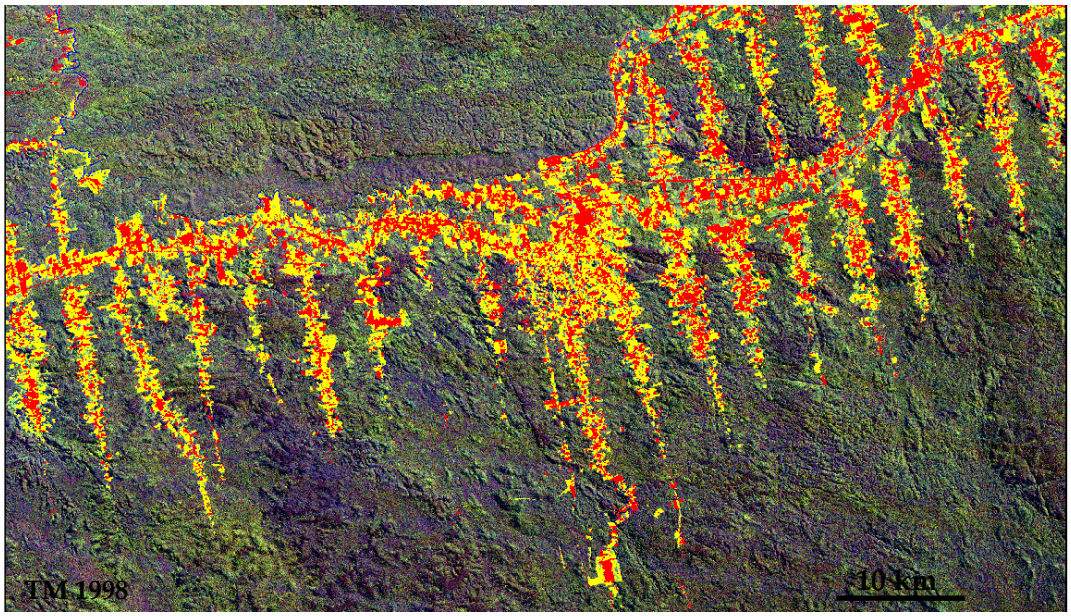
Pour évaluer quantitativement l'extension des fronts pionniers entre 1988 et 1998, nous avons comparé les statistiques obtenues à la suite des classifications indépendantes ou disjointes des deux images (fig. 43 et tableau associé). Afin de faciliter la comparaison, et étant donné que nous ne disposons pas de relevés de terrain, nous avons adopté une légende simplifiée, de manière à évaluer la surface des fronts pionniers sans une discrimination très poussée des différents états de surface. Le calcul de la surface occupée par les défrichements sur chaque extrait d'image a été effectué à l'aide d'un système d'information géographique.



TM5 de 98 en rouge, TM5 de 88 en vert, TM2 de 98 en bleu

Figure 42. L'extension des fronts pionniers entre 1988 et 1998 dans le Para : suivi à partir d'une composition colorée multidate d'images Landsat TM





Pâturages, friches

Cultures, bâti, routes

Forêt dense

Eau

Occupation du sol	1988 ha	1988 %	1998 ha	1998 %	Evolution 1988-1998 ha	Evolution 1988-1998 %
Défrichements	80 157	16	141 990	28	+ 61 833	+12
Forêt et eau	427 610	84	365 963	72	- 61 647	-12
Total	505 767	100	505 953	100	/	/

Figure 43. L'évolution des fronts pionniers dans le Para entre 1988 et 1998 : quantification à partir des classifications séparées de deux images Landsat TM

Les résultats (fig. 43 et tableau associé) montrent qu'en 1988, avec une surface de 80157 ha, les fronts pionniers représentent 16 % de la zone cartographiée, tandis qu'en 1998, les défrichements s'étendent sur 141 990 ha, soit 28 % de la surface totale. Le rythme annuel de défrichement a donc été de 1,2 % entre 1988 et 1998. Même s'il n'est pas représentatif de l'ensemble de l'Amazonie brésilienne, cet exemple permet de prendre la mesure de l'évolution du phénomène. Il offre un aperçu de l'ampleur des fronts pionniers au niveau sous-régional. Cette ampleur est-elle identique au niveau régional ? Autrement dit, comment évoluent les défrichements agricoles dans toute l'Amazonie brésilienne ?

III. Evolution des défrichements agricoles au niveau régional

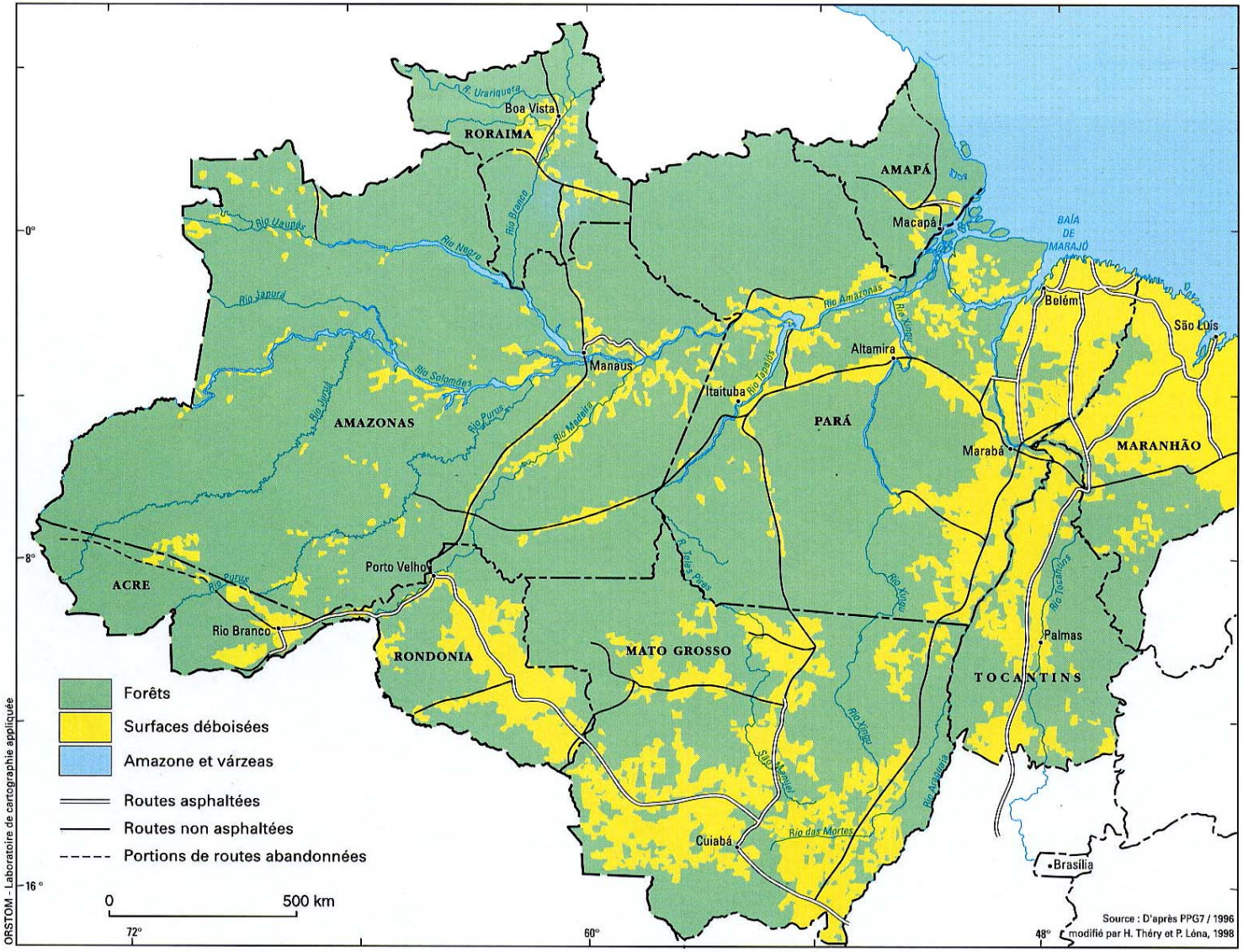
Dès le chapitre 1, nous avons indiqué qu'au niveau régional ou continental, deux démarches peuvent être mises en œuvre pour observer l'évolution de la déforestation. La première consiste à utiliser les images fournies par les capteurs à large champ (NOAA AVHRR, Spot 4 VEGETATION) pour établir les cartes du couvert végétal à petite échelle (1/500 000 à 1/5000 000). La deuxième approche consiste à utiliser les mosaïques d'images de haute résolution spatiale pour évaluer périodiquement l'étendue des forêts et de la déforestation. Ces deux démarches sont récentes car comme nous l'avons expliqué plus haut, les besoins de suivi du couvert végétal tropical émanent de préoccupations environnementales contemporaines. Ainsi, le « monitoring » des massifs forestiers régionaux (Afrique centrale et Amazonie, Asie du Sud-Est) par télédétection se met encore en place.

Nous allons nous appuyer sur les travaux de l'institut national d'études spatiales du Brésil (INPE) pour décrire l'évolution des défrichements agricoles sur l'étendue de l'Amazonie brésilienne. Nous aurions pu utiliser les images NOAA AVHRR reçues quotidiennement à la station du LRT depuis 1998, mais les analyses préliminaires ont révélé que l'intervalle de temps (1998 à 2002) n'est pas suffisant pour mettre en évidence l'évolution des défrichements à partir de ce type d'images. Les statistiques que nous allons utiliser sont issues du traitement des séries d'images Landsat compilées annuellement par l'INPE. Bien que n'ayant pas de précisions d'une part

sur les méthodes et techniques de traitements appliquées aux images, et d'autre part sur la signification thématique réelle des chiffres, nous pensons, à la suite d'autres auteurs (Léna, 1999 ; Pasquis, 1999) que les chiffres de l'INPE donnent un aperçu de l'évolution de l'emprise spatiale des défrichements agricoles en forêt amazonienne du Brésil. Ces chiffres indiquent que les superficies totales défrichées en Amazonie brésilienne sont passées de 15,2 millions d'hectares en 1978 à 51,7 millions d'hectares en 1996 (tabl. 34), soit une augmentation de 240 % en 20 ans, c'est à dire une progression annuelle de 7 % (croissance exponentielle). D'après ces chiffres, la forêt amazonienne du Brésil a perdu 10 % de son étendue, soit l'équivalent du territoire de la France métropolitaine. Il convient toutefois de nuancer cette observation, car dans ce que l'INPE a identifié sur les images Landsat et cartographié comme étant des surfaces déboisées (fig. 44), se trouvent vraisemblablement l'ensemble des surfaces non forestières, y compris les savanes qu'on pourrait qualifier de naturelles (*cerrados*). C'est pour cette raison que le Para et le Maranhâo, et dans une moindre mesure le Mato Grosso, apparaissent sur cette carte comme étant les Etats qui ont les plus grandes superficies de forêt déboisée (fig. 44 et tabl. 34).

La figure 45 montre qu'après un pic des défrichements en 1988, il y a eu une faible progression des surfaces défrichées jusqu'en 1992, au moment du sommet de Rio. Une recrudescence des défrichements est survenue au lendemain de ce forum mondial consacré à l'environnement. D'après l'expression de Fearnside (1997), la déforestation est « repartie de plus belle » depuis cette date.

Les taux moyens de nouveaux défrichements par an nuancent quelque peu la lecture précédente de l'évolution de la déforestation en Amazonie brésilienne. Ils indiquent qu'après une moyenne annuelle de 2 millions d'hectares entre 1977 et 1988, le rythme des défrichements a ensuite baissé, se situant autour de 1,5 millions d'hectares par an jusqu'en 1994, avant de connaître un regain considérable en 1995 avec une surface défrichée atteignant 2,9 millions d'hectares (tabl. 34 et fig. 46). On assiste depuis 1996 à la stagnation, voire la régression des surfaces défrichées. Les dernières évaluations font état d'une déforestation annuelle portant sur 1,6 millions d'hectares



Extrait de *Autrepart* n°9, 1999

Figure 44. Détection des zones défrichées en Amazonie brésilienne en 1996 à partir d'images Landsat TM

Tableau 34. Surfaces défrichées en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996 (000ha)

Etats et superficies		1978	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1996
Acre	15 258	250	890	980	1030	1070	1110	1206	1330	1374
Amapa	13 906	20	80	100	130	170	173	173	178	178
Amazonas	155 898	170	1970	2170	2220	2320	2399	2473	2662	2743
Maranhâo	32 461	6390	9080	9230	9340	9410	9523	9597	9776	9933
Mato Grosso	88 100	2000	7150	7960	8360	8650	9117	10361	11215	11914
Para	122 753	5640	13150	13930	14420	14800	15178	16035	16900	17613
Rondônia	24 300	420	3000	3180	3350	3460	3686	4205	4615	4864
Roraima	23 010	10	270	360	380	420	448	496	512	536
Tocantins	28 670	320	2160	2230	2290	2340	2380	2447	2514	2548
Total Amazonie	504 359	15220	37750	40140	41520	42640	44018	46997	49705	51706
Nouveaux défrichements		2113	1786	1381	1113	1378	1489	2905	1816	1322

Sources : Droulers (1995) ; Léna (1999) ; Pasquis (1999), d'après les calculs effectués par l'INPE sur les images TM

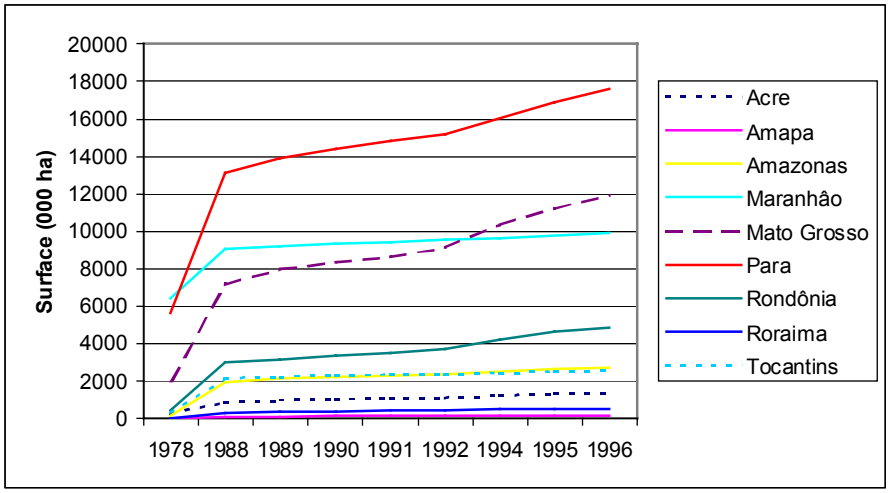


Figure 45. Evolution des surfaces totales défrichées en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996

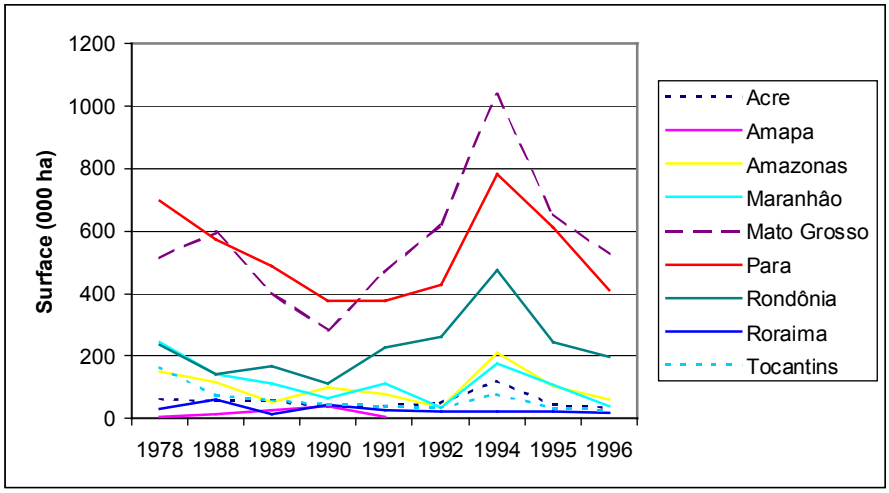


Figure 46. Evolution des défrichements annuels en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996

(chiffre de 1998 cité par Pasquis, 1999). Ce recul des surfaces défrichées a été confirmé par les derniers recensements agricoles qui ont mis en évidence la diminution des superficies mises en culture ou pâturées (Waniez et *al*., 1999). Cette situation est sans doute due à la suppression, effective depuis 1991, des crédits et autres avantages fiscaux dont bénéficiaient les *fazendeiros*.

Au terme de ce chapitre, quelles conclusions pouvons-nous tirer sur l'utilisation de la télédétection pour mettre en évidence et caractériser l'évolution des défrichements agricoles en Amazonie ? A partir d'exemples pris en Guyane française et au Brésil, l'analyse diachronique des photographies aériennes et d'images satellites a montré que la télédétection offre l'opportunité de suivre les modifications qui surviennent dans l'occupation du sol. Les photographies aériennes, plus anciennes, permettent d'analyser les mutations spatiales au niveau local. Quant aux images satellites, plus récentes, elles renouvellent l'approche de l'environnement et ouvrent de nouvelles perspectives de suivi, avec notamment la fourniture continue d'enregistrements et l'amélioration sans cesse croissante des résolutions spatiales qui sont de plus en plus fines.

Sur le plan thématique, nos résultats montrent que la variante guyanaise de l'agriculture itinérante sur brûlis est peu consommatrice d'espace et n'entrave pas irréversiblement la reconstitution du couvert ligneux. Cette situation, bien différente de ce qui est généralement relevé ailleurs dans le monde tropical et en particulier en Afrique de l'Ouest et en Amazonie brésilienne (Fleury, 2000 ; Léna, 1999 ; Léonard et Oswald, 1999 ; Pomel et Salomon, 1998 ; Fearnside, 1997 ; Albaladejo et Tulet, 1996) est liée non seulement aux spécificités de la pratique des abattis en Guyane française, mais aussi aux caractéristiques socio-économiques des zones rurales guyanaises. Alors qu'ailleurs ce sont des milliers d'hectares qui sont incendiés puis continuellement mis en culture ou pâturés, dans un contexte démographique et économique qui exige une forte production pour satisfaire les besoins de la population et du marché, en Guyane française, les superficies essartées et mises en

culture sous forme d'abattis restent très modestes et suffisent à combler les besoins alimentaires d'une population certes modeste, mais en augmentation croissante.

Au vu des aménagements en cours ou projetés en Guyane, et compte tenu de son caractère souvent spontané et précaire au sens de la gestion foncière, il semble à présent opportun d'organiser la pratique des abattis et de l'intégrer dans un dispositif d'aménagement rural, en prévision d'un probable flux d'immigration et de multiplication conséquente des défrichements. Dans le cadre de la planification de cette activité, il ne faudrait pas perdre de vue que, plus le territoire qui lui est consacré est étendu, plus les risques de déforestation et de dégradation de l'environnement sont amenuisés. C'est en effet à l'intérieur du territoire concédé à la pratique de cette activité agricole que les populations concernées s'approvisionnent aussi en produits de chasse, de cueillette et de pêche.

Les exemples traités ont fait état d'un rythme annuel de déforestation de 0,26 % pour les abattis en Guyane française, et 1,2 % pour les fronts pionniers au Brésil. Cette différence est liée aux modalités des deux types de défrichements et aux contextes démographiques et socio-économiques.

L'approche hiérarchique ascendante a permis de montrer la complexité des dynamiques d'occupation du sol liées aux abattis (recrûs forestiers consécutifs à la mise en jachère) par rapport à la relative simplicité de l'évolution des fronts pionniers qui ne mettent pas en évidence les processus de reforestation aux niveaux sous-régional et régional. Cette connaissance fine des structures, de l'organisation et de l'évolution des défrichements, est de bonne augure pour envisager une chronologie d'acquisition d'images et une chaîne de traitements en vue de suivre l'occupation du sol et surveiller la forêt amazonienne.

CHAPITRE 7

VEILLE AEROSPATIALE POUR LE SUIVI DES DEFRICHEMENTS AGRICOLES EN AMAZONIE

Les chapitres précédents ont montré comment les images satellites et les photographies aériennes peuvent être utilisées pour décrire et quantifier l'étendue des défrichements agricoles et leur évolution spatio-temporelle en forêt amazonienne. Les exemples que nous avons présentés ont été traités en fonction de la disponibilité des données de qualité acceptable sur les sites d'intérêt, ce qui dénote du caractère sporadique de l'exercice. Pour un suivi régulier qui ne se fasse pas ponctuellement çà et là au gré de l'acquisition d'images de bonne qualité, il est 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.

Dans cette optique, les développements qui vont suivre tirent parti de nos acquis méthodologiques et thématiques, en même temps qu'ils les complètent. Ils s'inspirent en outre des travaux de télédétection portant sur les régions forestières tropicales, et en particulier l'expérience pratique du LRT dans le contexte amazonien. Il s'agit, au stade terminal de cette recherche, de proposer un vade-mecum pour un suivi opérationnel de l'environnement forestier amazonien. Précisons que les défrichements agricoles ne sont pas les seuls objets spatiaux dont on pourrait suivre l'évolution en Amazonie ; l'orpaillage, la croissance urbaine, les inondations, les carrières et les pistes, y posent aussi des problèmes sur le plan de l'aménagement du territoire et la gestion de l'environnement.

Nous essaierons d'abord de trouver des solutions aux contraintes imposées par les spécificités géographiques et climatiques aux enregistrements effectués dans les

diverses longueurs d'onde. Puis, en tenant compte de ces spécificités, nous préconiserons une chaîne d'acquisition et de traitement d'images, en spécifiant les niveaux spatiaux de déclenchement d'alertes. Enfin, nous proposerons des indicateurs complémentaires de suivi non issus des données de télédétection.

I. Faire face aux contraintes de la surveillance de l'environnement amazonien par télédétection

La télédétection offre des outils pertinents pour surveiller les empreintes anthropiques en forêt amazonienne. Cependant, la forte nébulosité est une des contraintes qui limitent l'utilisation d'images satellites pour observer l'environnement dans les régions tropicales. Comment faire face à cette contrainte majeure ? Après avoir rappelé le cadre géographique amazonien et les caractéristiques spatiales des phénomènes à surveiller (les défrichements agricoles), nous résumerons les apports et limites des différents systèmes d'acquisition d'images, avant de proposer des solutions qui permettent de faire face à la détérioration des enregistrements satellites par la couverture nuageuse.

I.1. Spécificités du cadre géographique et des phénomènes à surveiller

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 : seulement 3 habitants au km² (Droulers, 1995). Ainsi, 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. Ainsi, sur le plan physiographique, on observe une variété de paysages : forêt de terre ferme, mangroves, savanes, bas-fonds hydromorphes (*varzeas*). Au plan humain, les grandes agglomérations du Brésil contrastent fortement avec les petites villes et bourgs de la Guyane française. Cette dualité des échelles souligne la nécessité de recourir aux outils qui permettent un suivi multi-scalaire.

Au plan climatique, les longues saisons pluvieuses, et par conséquent, les courtes périodes sèches (généralement 3 à 4 mois en Guyane française, cf. fig. 7, p. 76), 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 géographiques et climatiques doivent être prises en compte dans la spécification des outils d'observation, car elles conditionnent la bonne utilisation des images.

Cette considération est d'autant plus importante que les spécificités des phénomènes à suivre en Amazonie suggèrent que la télédétection y est indispensable pour cette finalité. Pour les défrichements agricoles qui nous intéressent dans ce mémoire, nous avons vu qu'ils laissent dans la forêt des traces de dimensions très variables. Ces traces sont la transcription spatiale d'opérations d'occupation du sol tantôt concertées, tantôt non concertées. Elles se déroulent 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. Cette évolution s'accompagne de dynamiques spatiales dont l'ampleur varie considérablement, à l'instar de la dimension des parcelles mises en culture ou pâturées.

Tous ces éléments doivent être intégrés dans la stratégie à mettre en œuvre pour suivre par télédétection les atteintes à la forêt. Pour qu'elle soit efficace, cette stratégie doit s'appuyer sur des méthodes adaptées aux échelles spatiales et temporelles des défrichements, 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.

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

Toutes les données de télédétection présentent un intérêt pour la localisation, l'identification et la description des formes d'occupation du sol. Qu'ils soient visible, infrarouge, thermique 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 des 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. D'une manière générale, en dépit de son 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, elle n'est pas aussi intuitive que l'interprétation d'images acquises dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge.

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 et/ou soustractives des couleurs : il s'agit d'images panchromatiques ou « noir sur blanc », et surtout d'images multispectrales ou couleur. 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 reflectance 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, comme le montrent les compositions colorées des chapitres 4 et 5 (cf. fig. 15 p. 113, fig. 16 p. 114, fig. 24 p. 138).

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, comme nous l'avons souligné plus haut en évoquant le cadre géographique et climatique de l'Amazonie, la principale limitation des capteurs optiques concerne leur sensibilité aux conditions météorologiques particulièrement sévères dans les régions tropicales humides. 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 ?

I.3. Se passer de l'obstruction induite par les nuages

En Guyane française par exemple, les nuages occupent constamment plus de 75% de la surface des scènes Spot (entre D et E, d'après 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.

I.3.1. Trouver la fenêtre idéale d'acquisition des images

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). 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, car il est 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 tous les 16 jours[1]. Notre expérience de la télédétection en Guyane française et au Nord du Brésil montre qu'à 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). Les images Landsat sont souvent de bonne qualité, du fait que le ciel est parfois dégagé à l'heure de passage du satellite.

Une étude statistique conduite par Asner (2001) précise les périodes adéquates pour obtenir en Amazonie brésilienne les images Landsat ayant une couverture nuageuse qui ne remet pas en cause leur utilisation. 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 (fig. 47). 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 (fig. 48).

[1] il s'agit ici des heures solaires locales.

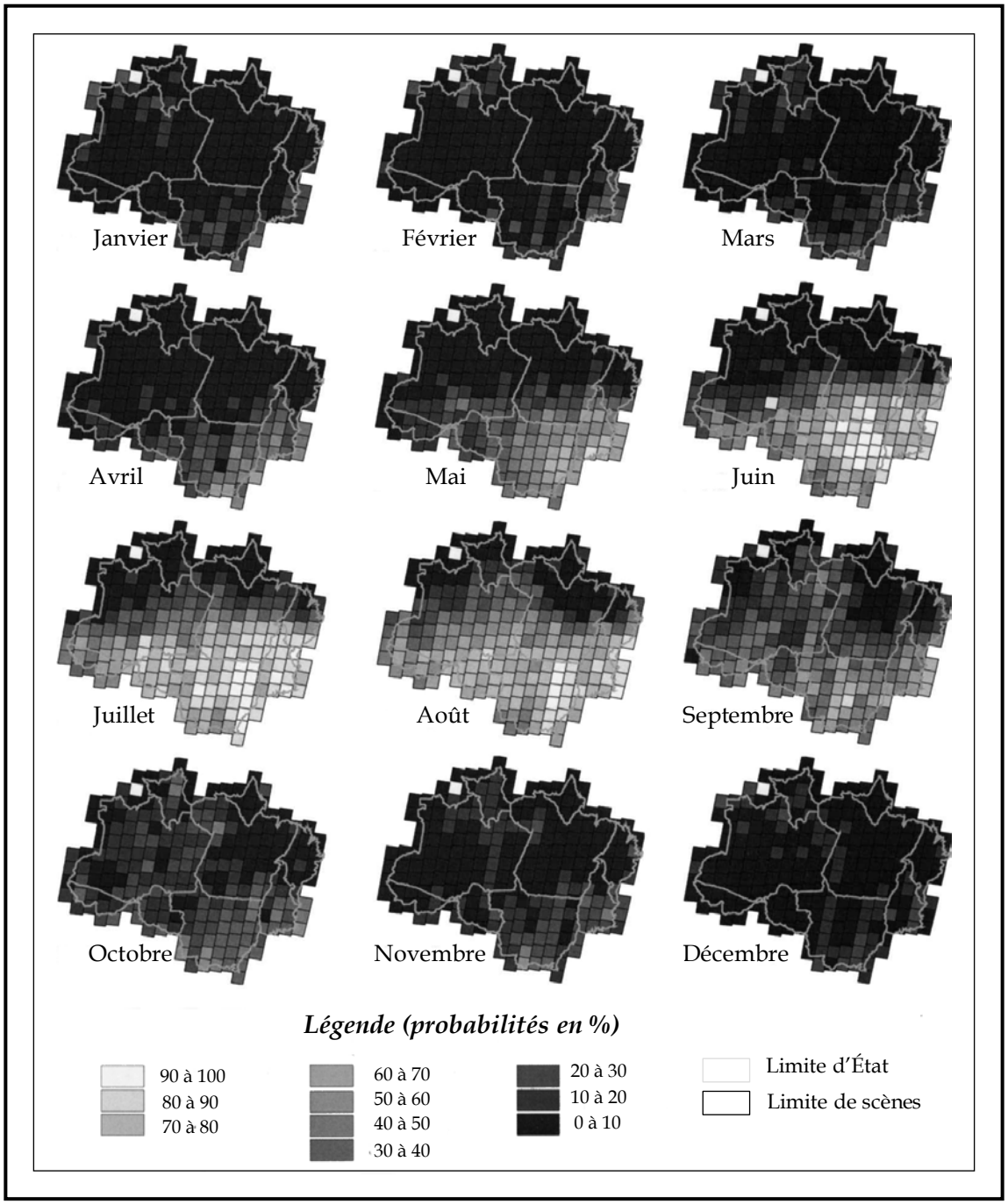


Figure 47. Probabilité d'acquisition mensuelle d'une scène Landsat TM avec une couverture nuageuse inférieure ou égale à 30 % en Amazonie brésilienne (d'après Asner, 2001)

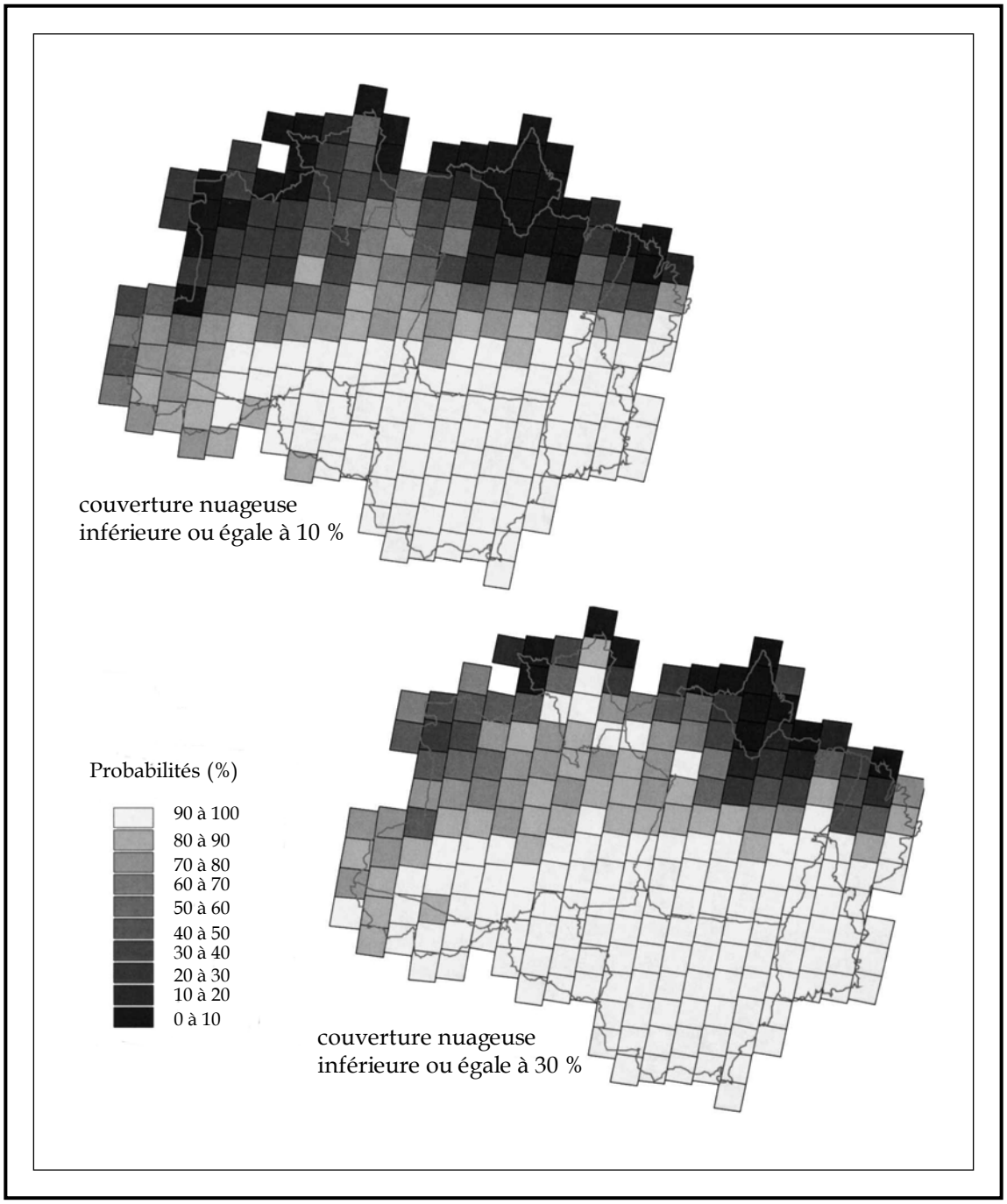


Figure 48. Probabilité d'acquisition annuelle d'une scène Landsat TM de couverture nuageuse inférieure ou égale à 10 % et 30 % en Amazonie brésilienne (d'après Asner, 2001)

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.

Ces résultats montrent 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 échelle 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 à des dates différentes par un même capteur.

I.3.2. 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 multidate), soit par des capteurs différents (fusion muli-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 ; Naceur et *al*.,2000 ; Pohl et *al*., 1998 ; Mangolini et *al*., 1993 ; Chavez et *al*., 1991). Quelle que soit la méthode utilisée, il est indispensable, au préalable, de recaler 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.

La fusion a généralement pour but d'améliorer la résolution spatiale, car très souvent, il s'agit d'associer une image multispectrale de résolution spatiale moyenne ou haute (Landsat TM, Spot XS), à une image panchromatique de très haute résolution spatiale (Spot P, photos ariennes, images radar). Lorsque les images d'une scène sont acquises avec un intervalle de temps très court (quelques jours ou quelques mois), la fusion peut permettre d'améliorer la qualité des images et d'effectuer la mise à jour des informations.

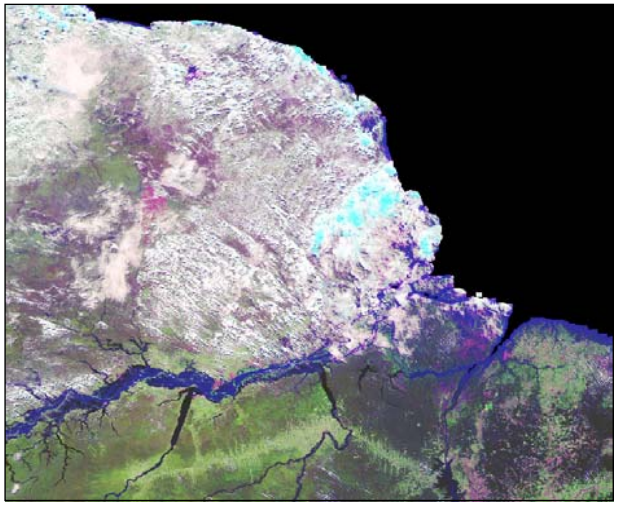
En vue d'éliminer les nuages et améliorer la qualité des données, nous avons testé deux types de fusion : la fusion multidate (images Spot 4 VEGETATION), et la fusion multi-capteur (image Spot XS et photographies aériennes, images ERS-1 et JERS-1).

I.3.2.1. Fusions d'images Spot 4 *VEGETATION* en vue de remplacer les pixels nuageux

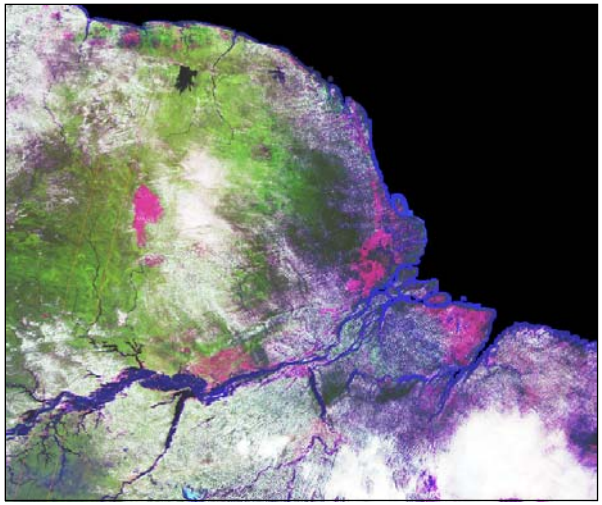
La cadence d'acquisition journalière de Spot 4 VEGETATION offre la possibilité de disposer régulièrement de nombreuses images qui peuvent être combinées pour produire une synthèse dépourvue de pixels nuageux. L'approche consiste à utiliser les images acquises à des dates différentes, en faisant l'hypothèse que les nuages ne sont pas toujours aux mêmes endroits.

La figure 49 présente un simple raccordement de deux images Spot 4 VEGETATION enregistrées en l'espace de 3 mois. Une épaisse couverture nuageuse masque l'information sur les ¾ de la première image (au nord du fleuve Amazone), tandis que sur la deuxième image, le secteur détérioré est situé principalement au sud de l'Amazone. En réalisant une mosaïque des parties les moins nuageuses des deux images, on obtient une scène de qualité globale nettement améliorée, offrant une vue d'ensemble de la forêt amazonienne et des fronts pionniers tels que décrits dans le chapitre 5.

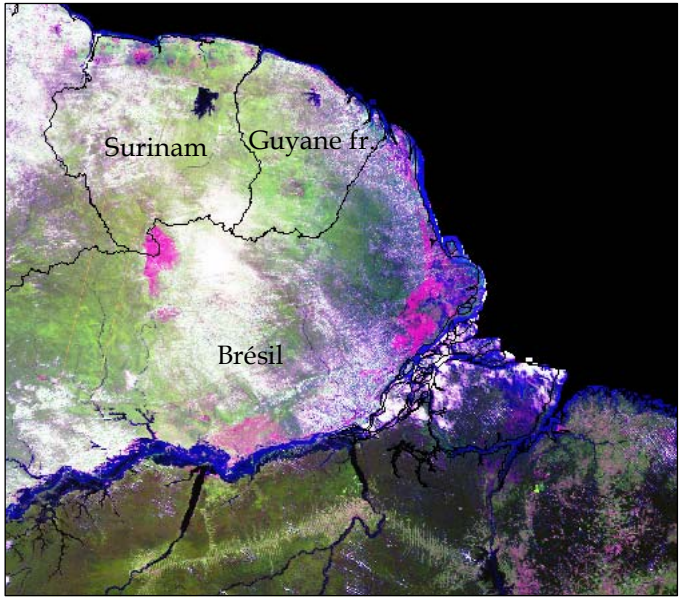
La figure 50 illustre un autre type de traitements permettant d'éliminer les nuages sur ces images. Ces nuages sont supprimés à partir des seuils établis dans les canaux du bleu et du proche infrarouge, car l'analyse préliminaire de la série d'images



a. Spot 4 VEGETATION, 07/06/00



b. Spot 4 VEGETATION, 03/09/00



Superposition de a et b : le fleuve Amazone sert de trait d'union (ligne de coupe)

200 km

Figure 49. Réduction de la couverture nuageuse par raccordement de deux images Spot 4 VGT

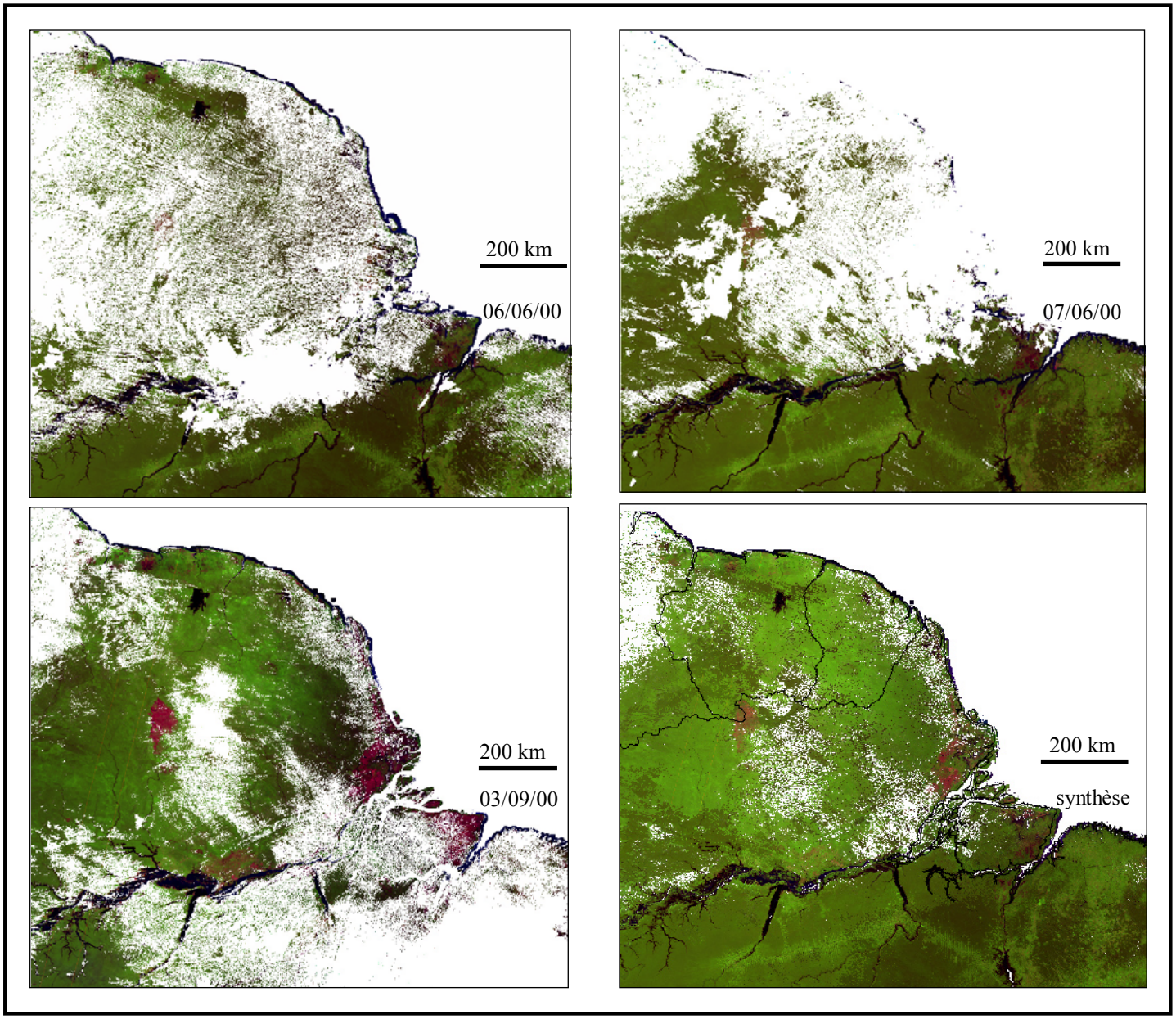


Figure 50. Synthèse multidate pour remplacer les pixels nuageux sur les images Spot 4 VEGETATION

indique 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 acquises pendant l'année 2000 sur la partie Nord-Est de l'Amazonie, cette méthode de traitement a permis d'élaborer une carte qui offre l'état global le plus récent de la forêt et des atteintes qu'elle subit (Gond, sous presse). En dépit de la géométrie moins stable des images NOAA AVHRR, on peut leur appliquer des traitements similaires, puisque leurs caractéristiques spatiales et orbitales sont semblables à celles d'images Spot 4 VEGETATION. Ces traitements accroissent les possibilités d'identification des fronts pionniers, mais pas des abattis qui ne peuvent être détectés qu'au niveau local.

I.3.2.2. Fusions multi-capteurs pour améliorer l'interprétation visuelle des données à l'échelle locale

Les exemples que nous allons traiter concernent d'une part la fusion d'une image Spot XS avec les photographies aériennes, et d'autre part la fusion d'images radar ERS-1 et JERS-1.

Le premier exemple porte sur les données de Saint-Georges de l'Oyapock présentées dans le chapitre 5. Il s'agit de l'image Spot XS du 29 février 2000 (cf. fig. 29 p. 147) et de la mosaïque des photographies aériennes de 1997 (cf. fig. 31 p. 152). Un intervalle de trois ans sépare donc 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 (fig. 51). 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 (fig. 52). Ainsi, les structures spatiales impossibles à détecter sur l'image Spot (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). 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.

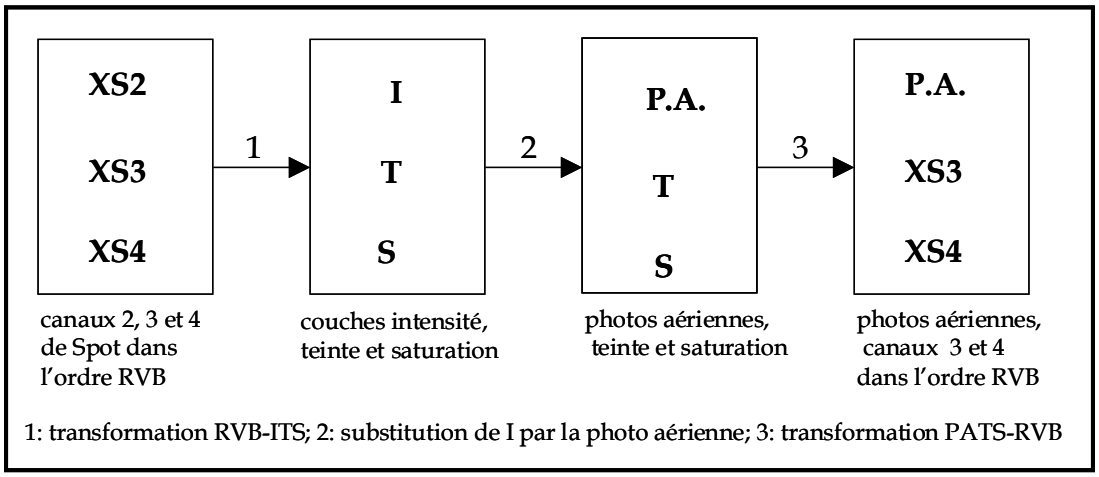


Figure 51. Méthode de fusion d'images par transformation RVB-ITS-RVB

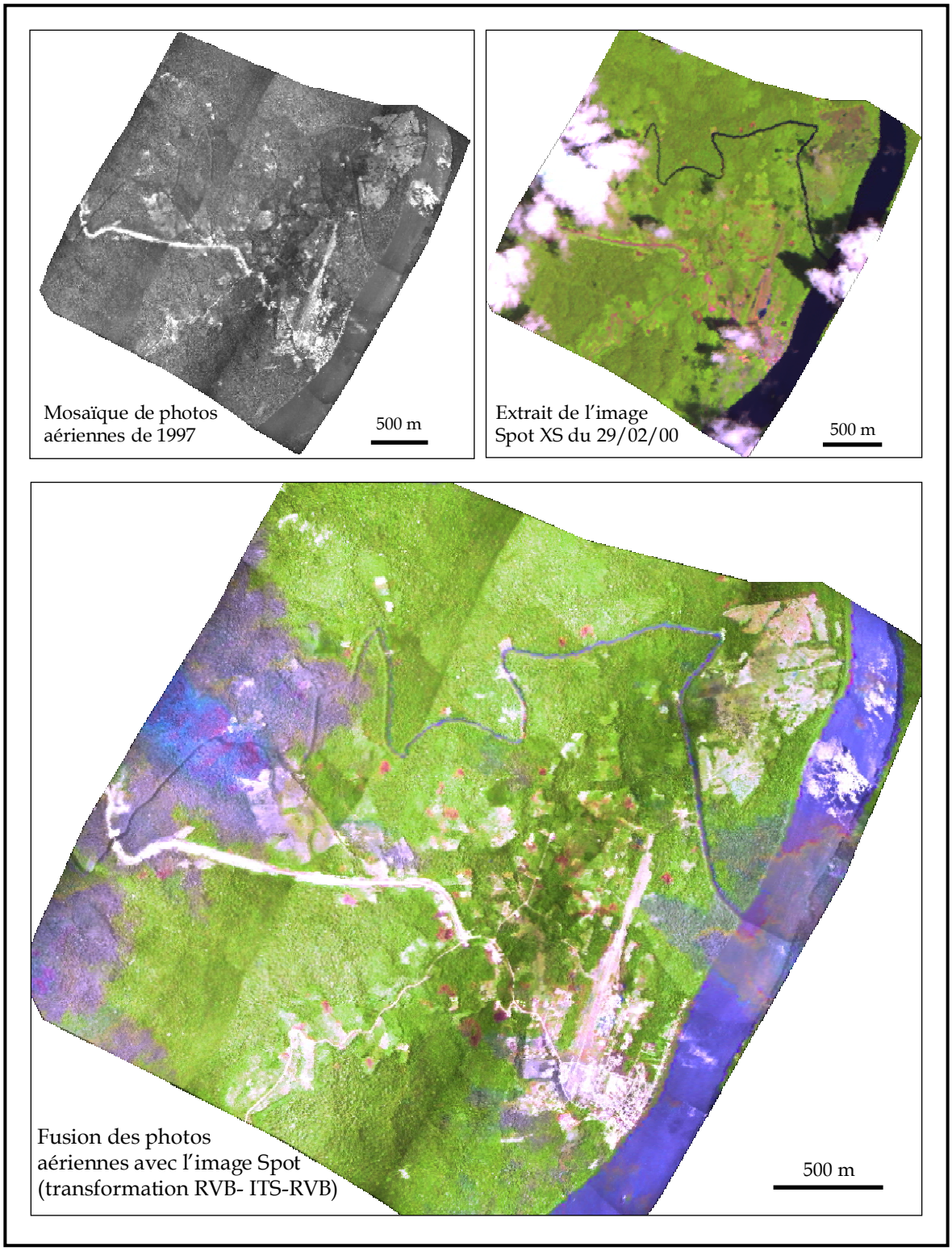


Figure 52. Fusion des photographies aériennes avec une image Spot XS pour améliorer l'identification visuelle des types d'occupation du sol à Saint-Georges

Le deuxième exemple de fusion multi-capteur porte sur les images radar de Charvein . Il s'agit d'images ERS-1 de 1993 et JERS-1 de 1995 déjà utilisées dans le chapitre 5 pour décrire l'occupation du sol au niveau local (cf. fig. 30 p. 149). 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 (fig. 53). Les empreintes anthropiques (routes, défrichements agricoles, bâti) apparaissent en magenta, et la végétation en vert.

Tous ces exemples montrent que la fusion d'images multidate et multi-capteur 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.

II. Stratégie de surveillance et de gestion de l'espace par télédétection

A présent, il faut tirer les enseignements de cette étude, afin de spécifier une procédure de « monitoring » de la forêt amazonienne par télédétection. Il s'agit de conseiller une chaîne d'acquisition et de traitement d'images, en précisant les niveaux spatiaux d'alerte. Pour cela, il convient de tenir compte de deux éléments essentiels :

- Les caractéristiques spatiales et l'évolution temporelle des types d'occupation du sol (défrichements agricoles et autres atteintes qui affectent le couvert forestier).
- Les performances des systèmes d'observation par télédétection (fauchées, résolutions spatiales et spectrales des capteurs, cadence de revisite).

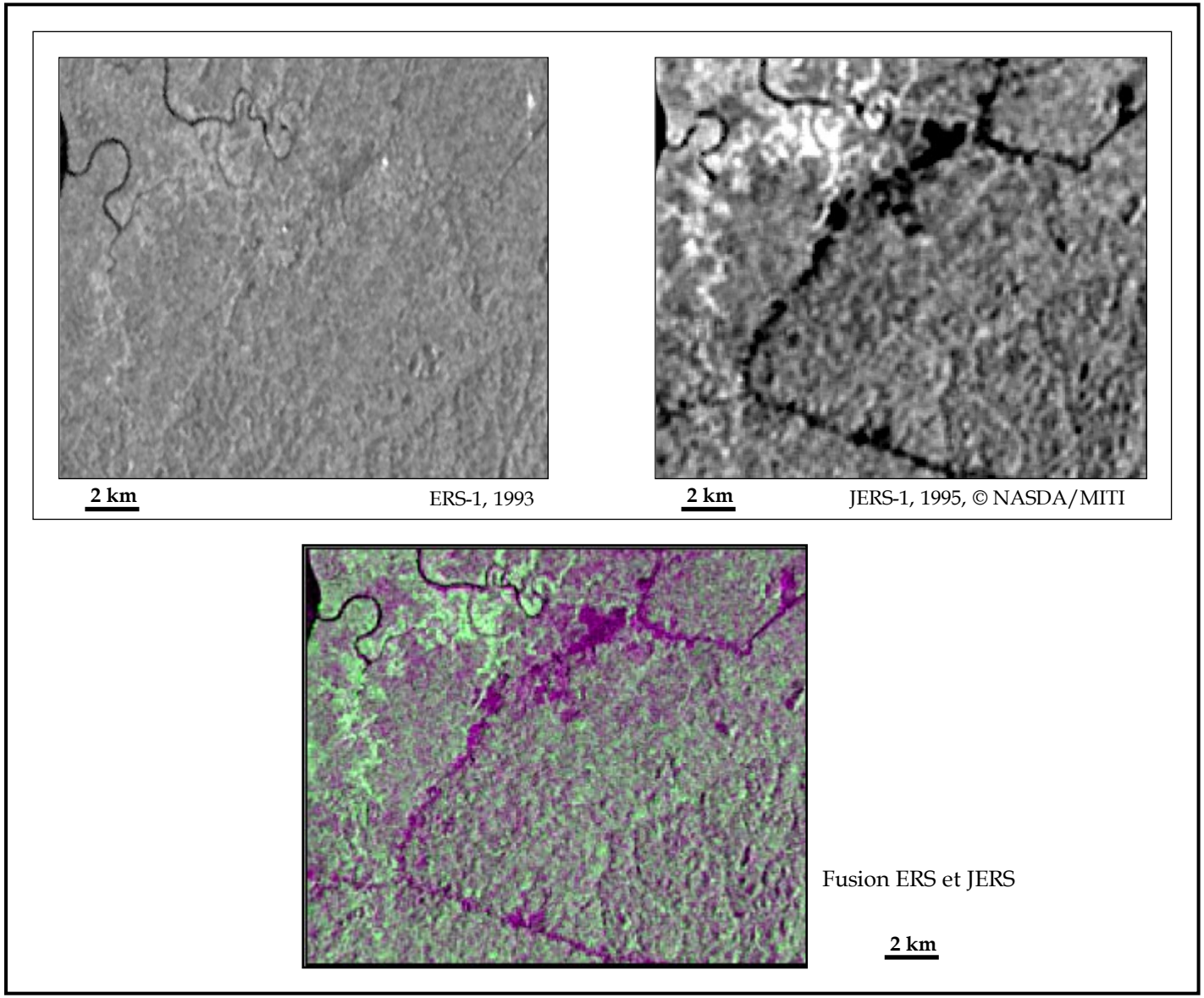


Figure 53. Fusion d'images radar pour améliorer la visu-interprétation de l'occupation du sol à Charvein

Cette double considération nous conduit à proposer une stratégie de suivi multi-scalaire qui se décline en trois niveaux spatiaux (fig. 54) correspondant aux échelles de déclenchement d'alertes (niveau régional, sous-régional et local)

1. Le niveau régional

Il englobe la quasi totalité des pays du bassin amazonien (Vénézuéla, 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 y suivre l'évolution d'ensemble des fronts pionniers. Les outils appropriés sont l'imagerie NOAA AVHRR et Spot 4 VEGETATION, 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 ans[2].

Une autre possibilité de suivi à petite échelle consisterait à utiliser les mosaïques d'images Landsat avec la même cadence temporelle de renouvellement des scènes (3 à 5 ans). Mais d'un point de vue financier et technique, cette solution paraît très exigeante, très coûteuse et difficilement opérationnelle, car il faudrait 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.

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

[2] en s'inspirant des travaux de Gond (sous presse). La fréquence journalière d'acquisition d'images NOAA AVHRR et Spot 4 VEGETATION est largement suffisante pour ce type de traitement qui permet de supprimer les nuages et d'avoir une vue globale de l'Amazonie. Rappelons que le LRT dispose d'une station de réception d'images NOAA, et que Spot-image fournit gratuitement les images Spot 4 VEGETATION qui datent de plus de 6 mois.

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.

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, voire moins, 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 permettra 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.

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

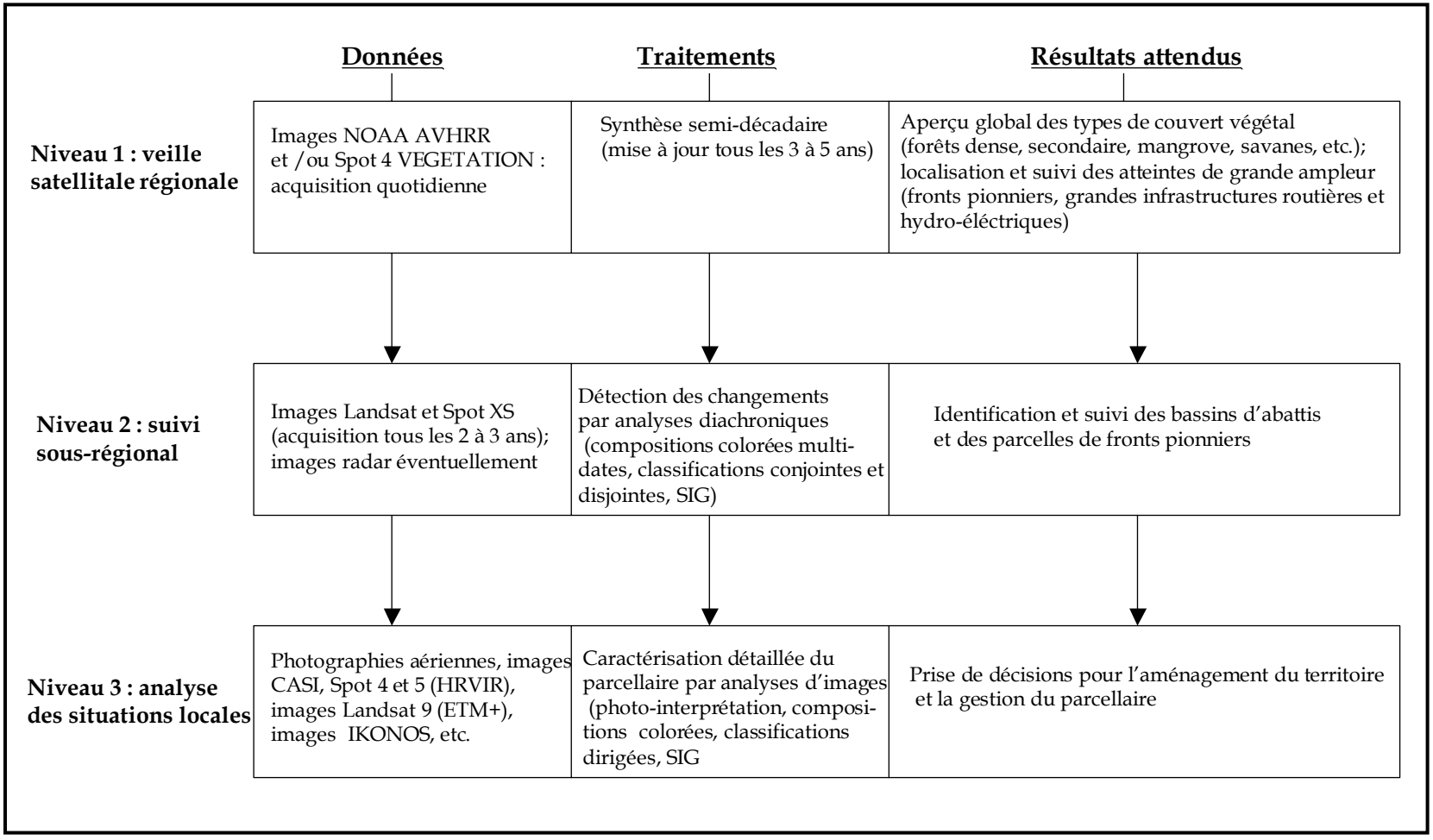


Figure 54. Stratégie proposée pour la surveillance de l'environnement forestier amazonien par télédétection

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, surtout que la région amazonienne est très grande mais 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. En raison du fait que les missions du prestataire officiel qu'est l'IGN, sont assez espacées dans le temps (tous les 5 à 10 ans), on peut éventuellement faire appel à d'autres prestataires qui proposent des moyens souples et plus rapides : survols aériens et prises d'images avec une caméra numérique[3]. 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.

La stratégie de suivi que nous venons de proposer s'inspire des traitements et des analyses que nous avons effectués sur les images utilisées dans le cadre de cette recherche. 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

[3] Le LRT a expérimenté cette solution depuis 1998, pour caractériser l'occupation du sol sur les sites prioritaires retenus par l'EPAG.

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.

III. Indicateurs complémentaires de perception et de suivi de l'environnement

Bien qu'elle soit indispensable pour la surveillance de l'environnement forestier amazonien comme nous l'avons démontré tout au long de cette étude, l'observation par télédétection peut néanmoins être complétée et enrichie par l'utilisation de variables quantitatives ou qualitatives qui font connaître indirectement l'ampleur et l'évolution des atteintes qui affectent le couvert forestier. Dans cette perspective, nous allons proposer un ensemble d'indicateurs, en suivant la typologie de l'Agence Européenne de l'Environnement qui distingue les indicateurs de pression, d'état et d'incidence[4].

III.1. Les indicateurs de pression

Ils décrivent les facteurs susceptibles de provoquer ou d'accentuer les atteintes à l'environnement : ce sont les causes ou les vecteurs.

- La densité démographique : elle renseigne sur la pression éventuelle que la population peut exercer sur le milieu et les ressources. Les recensements officiels de la population et de l'habitat fournissent les éléments nécessaires à l'élaboration de cet indicateur.
- La taille des implantations humaines dans un environnement forestier (assiettes urbaines, périmètres des bourgs) : cette variable donne une indication sur le mitage probable de la forêt par l'urbanisation ou la péri-urbanisation.

[4] European Environmental Agency (1999) Environmental indicators : typology and overview, Copenhagen, Technical Report N°25.

- La densité du réseau routier et la proximité des villes : elles donnent une idée du degré d'exposition de la forêt aux incursions humaines.
- Les types d'utilisation du sol et les superficies agricoles : ce sont des données issues de recensements agricoles : elles révèlent le caractère intensif ou extensif des pratiques agricoles et pastorales, ce qui permet de prévoir et de quantifier une éventuelle conversion de la forêt en espace agricole.
- Les conditions socio-économiques de la population : niveau de revenu, standing (utilisation ou non du bois-énergie par exemple). Il s'agit là d'un panel de critères permettant de décrire la propension de la population à faire usage ou non des ressources environnantes.
- L'instabilité politique régionale : elle renseigne sur les risques de guerre civile et de migration conséquentes de la population. Ces facteurs sont susceptibles d'entraîner une déforestation occasionnée par l'accueil et la réinstallation des migrants.
- Les régimes et pratiques fonciers : ils permettent d'entrevoir une éventuelle spéculation foncière qui provoquerait des défrichements spontanés ou non planifiés.
- Le commerce international : exportations du bois (fournissent une estimation de la quantité de bois prélevé), exportations de produits agricoles (traduisent une augmentation de la production suite à une éventuelle extension des surfaces agricoles au détriment de la forêt), exportations de la viande de bœuf (indiquent une déforestation consécutive à l'extension des surfaces pâturées : la fluctuation des importations de viande bovine brésilienne aux Etats Unis est souvent révélatrice de nouveaux défrichements opérés dans la forêt amazonienne[5]).

III.2. Les indicateurs d'état

Ils apportent un éclairage sur les modifications subies par l'environnement. Ces modifications peuvent être perçues à travers l'évolution dans le temps des indicateurs de pression : accroissement démographique, extension des surfaces

[5] Cette variable a donné lieu à l'expression « hamburger connexion ».

cultivées et des pâturages, mutation des structures foncières. Mais il existe aussi des indicateurs spécifiques qui permettent d'appréhender l'état de l'environnement :

- L'exploitation forestière : quantité de bois extrait, superficies de coupes.
- Les incendies de forêt : occurrence d'apparition et champ de propagation.
- La structuration spatiale du couvert forestier : fragmentation, degré d'homogénéité ou d'hétérogénéité, taux de recouvrement du sol par la canopée, etc. Il s'agit d'un ensemble d'indices qui rendent compte de l'étendue de la forêt et de la dimension des portions grignotées.
- Types de végétation, taux de biomasse et résilience du milieu : ce sont des indicateurs de la qualité et de la quantité de végétation (biodiversité).

III.3. Les indicateurs d'incidence

Ils donnent un aperçu de l'impact anthropique et écologique de la détérioration du milieu.

- La fréquence ou la récurrence des inondations : elle reflète la destruction de la couverture végétale dans un bassin versant.
- L'érosion des sols : souvent engendrée par la disparition du couvert forestier qui protégeait le sol en interceptant les pluies.
- La baisse des rendements agricoles : elle révélerait l'épuisement des terres, synonyme d'exacerbation de l'utilisation et de la dégradation du milieu.
- Le réchauffement climatique : augmentation des températures de surface, augmentation du taux de CO_2, effet de serre, etc. Cet ensemble d'indicateurs est fondé sur l'hypothèse que la déforestation réduit le rôle que la forêt joue dans la régulation des mécanismes du cycle climatique. Diverses équations et modèles, dont la plupart font encore l'objet de recherche et d'expérimentations, ont été élaborés pour expliquer et simuler ces interrelations entre déforestation et réchauffement du climat.

Associés aux données de télédétection, ces indicateurs apportent des informations additives qui complètent et accroissent les possibilités de surveillance de l'environnement forestier amazonien. Etant donné qu'ils reflètent les spécificités

géographiques et socio-économiques des régions considérées, ils renforcent et rendent encore plus opérationnelle la stratégie de suivi par télédétection que nous avons proposée. On peut d'ailleurs obtenir la plupart de ces indicateurs directement ou indirectement à partir d'images satellites et de photographies aériennes. Les estimations par télédétection, souvent grossières, peuvent être affinées avec les études ponctuelles, les enquêtes et les recensements démographiques et socio-économiques plus rigoureux et plus précis. La périodicité de renouvellement des informations est déterminée par les organismes publics en chargé de la collecte et du traitement des données (INSEE, DAF, structures décentralisées de l'Etat). Ce dispositif de suivi devra être amélioré et affiné en fonction des besoins des décideurs et des gestionnaires de l'environnement en Amazonie, car il leur revient d'élaborer des cahiers de charges précis, en tenant compte du contexte institutionnel et des pesanteurs historiques et culturelles.

CONCLUSION GENERALE

Le constat de la grande variabilité des statistiques citées dans la littérature pour rendre compte de l'ampleur de la déforestation en milieu tropical nous a amené à poser plusieurs questions : quelle réalité géographique les statistiques expriment-elles ? Par quoi la forêt est-elle remplacée lorsque la déforestation survient ? Quels sont les outils adaptés à la quantification et au suivi des surfaces déforestées ?

Au regard de ce questionnement, l'ambition de cette étude était de montrer comment les données de télédétection peuvent être utilisées pour décrire les défrichements agricoles et l'évolution de leur emprise spatiale en forêt amazonienne. Pour ce faire, nous avons traité l'exemple des abattis en Guyane française et celui des fronts pionniers au Nord du Brésil. L'objectif final était d'élaborer une stratégie de suivi par télédétection, en tenant compte des spécificités géographiques et climatiques du milieu amazonien.

Au plan méthodologique, cette recherche a été guidée par le souci d'intégrer les traitements d'images dans le raisonnement et la démarche géographique. De la sorte, les configurations spatiales et spectrales des abattis et des fronts pionniers ont été mises en évidence et décrites sur la base des connaissances de terrain et du contexte politique et socio-économique ayant présidé au déroulement des défrichements. L'analyse d'images a été conduite aux niveaux scalaires adaptés à l'emprise spatiale des défrichements. L'approche multi-scalaire utilisée a impliqué des traitements multi-capteurs, complétés par une analyse multidate pour détecter et évaluer les changements d'occupation du sol. Quel bilan pouvons-nous tirer de cette étude ?

Les enjeux écologiques, économiques et géopolitiques suscités par la situation des forêts tropicales au cœur des préoccupations environnementales actuelles, se traduisent par la multiplicité des évaluations quantitatives de la déforestation. Les statistiques les plus cohérentes, publiées par la FAO avec une régularité de plus en plus constante (quasiment tous les deux à cinq ans), permettent de prendre

globalement la mesure du phénomène. Le recours à la télédétection améliore les quantifications, même s'il ne s'accompagne pas systématiquement de précisions sémantiques sur le contenu géographique des chiffres.

Concernant l'accusation généralement formulée à l'encontre de l'agriculture itinérante sur brûlis, la réalité de terrain montre que la déforestation en milieu tropical est un phénomène plus hétérogène que ne le laissent présager les mythes, le discours dominant et les statistiques. Les causes, les processus et la taille des défrichements agricoles varient en fonction des choix politiques et des contextes socio-économiques.

Les abattis en Guyane française, et les fronts pionniers au Brésil, illustrent la diversité des situations de déforestation liée aux pratiques agricoles en Amazonie. Ces deux exemples montrent que lorsqu'ils sont spontanés et itinérants comme c'est souvent le cas des abattis, les défrichements agricoles posent des problèmes de gestion du foncier et d'aménagement/réaménagement du territoire. Dans le cas des fronts pionniers relevant d'une volonté planificatrice de l'Etat, le contrôle est rendu difficile par la quantité et la rapide extension des défrichements.

Pour ces deux situations, les enregistrements fournis par les satellites d'observation de la Terre, ainsi que les photographies aériennes, sont de précieux outils pour caractériser et suivre l'occupation agricole du sol. Les méthodes analogiques et numériques permettent de décrire qualitativement et quantitativement l'organisation spatiale des défrichements.

L'approche hiérarchique descendante a montré qu'à la variabilité des dimensions spatiales des parcelles défrichées, correspond une diversité d'images de résolution appropriée à la caractérisation des abattis et des fronts pionniers aux niveaux régional, sous-régional et local. Le niveau régional se prête bien à la détection et à l'identification des fronts pionniers à l'aide d'images NOAA AVHRR et/ou Spot 4 VEGETATION. Au niveau sous-régional, les images Landsat et Spot XS permettent

d'une part, d'affiner l'analyse des fronts pionniers, d'autre part, de détecter et identifier les abattis. Cependant, pour inventorier et cartographier les parcelles, il convient d'utiliser les images à très haute résolution spatiale, notamment les photographies aériennes. L'analyse est alors conduite à l'échelon local.

Malgré son caractère « tout temps », indispensable pour s'affranchir de la contrainte météorologique qui limite la qualité des acquisitions en mode passif, l'imagerie radar ne permet pas de caractériser de manière satisfaisante le parcellaire agricole. Toutefois, dans le cadre d'un dispositif de suivi basé sur les enregistrements optiques, les images radar constituent un complément utile.

Nous avons décrit l'évolution spatio-temporelle des défrichements en partant du niveau local au niveau régional (approche hiérarchique ascendante). Cette approche a permis d'évaluer la part des abattis et des fronts pionniers dans les dynamiques de déforestation/reforestation. Nos résultats ont montré que la déforestation imputable aux abattis progresse localement au rythme de 0,2 % par an en Guyane française, et s'accompagne de recrûs forestiers consécutifs à la pratique de la jachère. Cette situation contraste avec l'extension des fronts pionniers qui s'effectue à une vitesse de 1,2 % par an au niveau sous-régional, et ne s'accompagne pas de processus inverse conduisant à la reforestation, car les défrichements sont généralement définitifs.

Les traitements appliqués aux images, et les résultats qui en découlent, dénotent de la faisabilité de la surveillance de l'environnement forestier amazonien par télédétection. Ces résultats ont permis de proposer une stratégie de « monitoring » basée sur des méthodes simples pour fusionner les images multi-dates et/ou multi-capteurs. Ces fusions permettent d'améliorer la qualité des données par l'exploitation complémentaire des enregistrements issus de systèmes d'acquisitions différents. La stratégie globale proposée se décline en trois niveaux spatiaux d'alerte correspondant aux échelles d'observation régionale, sous-régionale et locale. Enfin, nous avons indiqué des variables socio-économiques et environnementales qui pourraient être

associées aux images pour assurer efficacement le suivi des atteintes subies par la forêt amazonienne. Il s'agit d'indicateurs de pression (densité démographique, production et exportations de viande bovine, commerce international de bois), d'état (exploitation forestière, incendies de forêts, quantité de biomasse) et d'incidence (fréquence des inondations, érosion des sols, baisse des rendements agricoles).

L'analyse critique de ces résultats montre cependant quelques insuffisances tant sur le plan méthodologique que sur le plan thématique. De nombreux aspects de cette recherche méritent donc d'être approfondis. Nous avons accordé une grande importance aux méthodes analogiques, privilégiant quelque peu la description à la quantification. Cette option s'explique par le fait que dans le contexte socio-politique amazonien, plus qu'un chiffre, l'image peut servir de pièce à conviction, d'indicateur ou de révélateur de l'ampleur de la déforestation. Il était donc important, dans un premier temps, de développer des méthodes simples qui permettent de « lire l'image » et de mettre en évidence son contenu géographique. C'est ce à quoi nous nous sommes attelé pour caractériser les abattis et les fronts pionniers. A présent, il est indispensable de poursuivre cette recherche en mettant au point des méthodes d'extraction automatique des défrichements agricoles sur les images satellites et les photographies aériennes. Cette approche passe nécessairement par une plus grande utilisation des outils statistiques et mathématiques, et sous-entend la modélisation des signatures spatiales et spectrales des abattis et des fronts pionniers. De la sorte, l'évolution spatio-temporelle des défrichements pourra être simulée, ce qui permettra aux gestionnaires de planifier l'occupation du sol de manière prévisionnelle. La télédétection servira alors d'outil d'aide à la décision et à la gestion anticipative de l'espace.

Il faut cependant se garder d'une modélisation à outrance non alimentée par l'expertise de terrain. Rien que pour la classification de l'image Spot 4 de Charvein, il a fallu intervenir en amont et en aval pour séparer les abattis du bâti sur la base des relevés de terrain. Cet exemple montre qu'à un type de configuration spatiale

peuvent correspondre plusieurs types d'occupation du sol. L'approche automatique ne doit donc pas dispenser des enquêtes de terrain.

On peut regretter dans ce travail la faible utilisation des images radar d'une part, et des images à très haute résolution spectrale d'autre part. Nous aurions pu explorer davantage l'apport des images JERS, CASI, IKONOS, Spot 5, Envisat, pour la détection et la caractérisation des défrichements agricoles. Le prix encore élevé de la plupart de ces données les rend malheureusement peu accessibles. Aussi, dans la limite du temps qui nous était imparti, il eut été difficile de prendre en compte toute la gamme des données de télédétection.

Une autre insuffisance de l'étude concerne le caractère peu rigoureux des découpages en niveaux d'observation. Ceux-ci sont d'abord liés aux capteurs : niveau régional et image NOAA, niveau sous-régional et images Landsat et/ou Spot, niveau local et photographie aérienne. Il s'agit d'un découpage de convenance qui est ensuite mis en correspondance avec les dimensions des surfaces défrichées. Les analyses et les statistiques qui rendent comptent de l'ampleur de la déforestation doivent toujours être considérées au niveau d'observation dont il est question.

En dépit de ces limitations, cette recherche ouvre des perspectives opérationnelles en particulier en Guyane française où les besoins de surveillance et de gestion de l'espace sont prégnants en raison de la précarité du statut foncier et de l'accroissement démographique qui se traduit par l'augmentation de la demande en terres. Dans ce contexte, le suivi par télédétection tel que nous le préconisons, constitue un précieux outil pour planifier et gérer au mieux l'occupation agricole du sol. Plus généralement, nos travaux permettent d'envisager l'implantation d'un observatoire de l'environnement, dédié non seulement au « monitoring » du parcellaire agricole, mais aussi à la surveillance des autres formes d'utilisation du sol, car en Guyane française, les besoins de gestion de l'espace ne concernent pas uniquement les défrichements agricoles, mais aussi l'orpaillage, la péri-urbanisation spontanée, l'exploitation forestière, etc.

L'intérêt pratique de cette étude se révèle par l'utilisation qu'en font déjà les organismes en charge de l'aménagement du territoire en Guyane française : EPAG, ARUAG, ONF, etc. Nos travaux ont servi à la réalisation du zonage agriculture-forêt et à la proposition de la révision du plan d'occupation des sols à Saint-Georges de l'Oyapock (convention DDE-ONF). Notre collaboration avec l'EPAG a consisté en la contribution à la caractérisation de l'occupation du sol par télédétection sur plusieurs sites ruraux (convention IRD/SIMKO-EPAG). Nous avons par ailleurs été consulté dans le cadre d'une étude devant conduire au réaménagement agricole du secteur Gabaret à Saint-Georges (convention EPAG-ARUAG).

Un projet d'observatoire de l'occupation du sol proposé par le Laboratoire Régional de Télédétection (LRT) du centre IRD de Cayenne est en cours de discussion entre plusieurs organismes de recherche implantés en Guyane (IRD, CIRAD, BRGM)[1]. Par ailleurs, le LRT mène actuellement une étude de faisabilité sur l'élaboration d'un outil d'informations spatialisées pour le suivi de la biodiversité du plateau des Guyanes (contrat de consultance entre le WWF et l'IRD). Les acquis méthodologiques et thématiques de ce travail constituent une contribution importante à la réussite de ces projets opérationnels d'observatoire. L'expérience peut être élargie à l'ensemble nord amazonien (Guyana, Surinam, Guyane française, Etats du Para et d'Amapa au Brésil). Dans cette perspective, les résultats de cette étude peuvent servir à renforcer la coopération régionale en matière de gestion de l'environnement forestier et de planification des grands travaux.

Nous ne saurons préconiser une surveillance de l'environnement tropical fondée sur un observatoire purement « géomatique » (solution clés en main). En effet, les modèles technicistes conçus ailleurs et importés dans les régions tropicales ont fait la preuve de leurs limites, car très souvent, ils ne tiennent compte ni des contraintes inhérentes au milieu, ni des pesanteurs socioculturelles et politiques locales. Pour une mise en place opérationnelle des projets de surveillance de l'environnement par

[1] Projet rédigé par Laurent Polidori à la suite des recommandations formulées par Mme Taubira-Delannon au sujet du contrôle de l'orpaillage clandestin par télédétection.

télédétection, l'approche géographique telle que nous l'avons développée nous paraît indispensable. Pour plus d'efficacité, le traitement et l'analyse d'images doivent en effet s'appuyer sur la connaissance du contexte géographique et historique.

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 qualifié), météorologique et géographique (couverture nuageuse, immensité du territoire, difficultés d'accès, rapidité des évolutions, diversités des types d'occupation du sol, complexité des phénomènes à suivre).

Dans ce contexte, il nous semble important d'explorer des pistes de recherche inédites en télédétection, outre celles que nous avons suggéré plus haut. Nous pensons à une recherche prospective consistant à établir des diagnostics géographiques 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[2]. 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.

[2] Cf. Liverman et *al*., 1998 : People and pixels ; linking remote sensing and social science.

Le souci d'application aux régions tropicales des résultats de ce travail a été constant tout au long de la recherche. Au vu des acquis méthodologiques en ce qui concerne la caractérisation et le suivi multi-capteur et multi-échelle des défrichements agricoles amazoniens, il est intéressant de mener des études similaires dans d'autres régions, notamment en Afrique centrale où la forêt dense humide est soumise à diverses pressions anthropiques : exploitation légale et illégale, péri-urbanisation, extension des plantations traditionnelles et industrielles, etc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les références bibliographiques sont numérotées en continu et classées en trois rubriques correspondant à l'ensemble des thèmes abordés dans cette étude. Même s'il n'est pas strict en raison du fait que plusieurs références sont mutli-thématiques ou transdisciplinaires, ce découpage allège la présentation et aiguille le lecteur. La première rubrique se rapporte aux forêts, à la déforestation et aux défrichements agricoles. La deuxième regroupe les références qui traitent de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) en rapport avec la problématique de la déforestation en milieu tropical. Enfin, la dernière rubrique rassemble les ouvrages et les articles à caractère général concernant un ou plusieurs aspects du sujet de cette thèse.

I. Références sur les forêts tropicales

1. Albaladejo C., Tulet J.C., 1996. Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne : des terrains pour une analyse des relations société-territoire, p.p. 17-41. *In Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne. Formation de nouveaux territoires* (éds : Albaladejo C., Tulet J.C.), Paris, l'Harmattan, 205 p.
2. Allen J., Barnes D.F., 1985. The causes of deforestation in developing countries. *In Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75 (2), p.p. 163-184.
3. Arnould P., 1999. L'écocertification ou la guerre des labels : vers une nouvelle géopolitique forestière ? *In Annales de Géographie*, n° 609-610, p.p. 567-582.
4. Bahuchet S. (coord.), 1994. *Situation des populations indigènes des forêts denses humides*, projet CCE, DG XI, Office des publications officielles des Communautés européennes, http://lucy.ukc.ac.uk/Sonja/RF/Frpr/prfr09.htm
5. Bahuchet S. (coord.), 2000. *Les peuples des forêts tropicales aujourd'hui*. Bruxelles : APFT-ULB, 5 volumes.
6. Bahuchet S., 1997. Un style de vie en voie de mutation : considérations sur les peuples des forêts denses humides. *In Civilisations*, vol. XLIV, n°1-2, p.p. 16-32.
7. Barreau J., 1972. Culture itinérante, culture sur brûlis, culture nomade, écobuage ou essartage ? Un problème de terminologie agraire. *In Etudes Rurales*, n° 45, p.p. 99-103.
8. Becker B.K., 2001. La dimension géopolitique du processus d'occupation de l'Amazonie brésilienne, p.p. 447-472. *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.
9. Bergeret A., 1993. Discours et politiques forestières coloniales en Afrique et à Madagascar, p.p. 23-47. *In Colonisations et environnement* (sous la direction de Pouchepadass, J.), Paris, Société d'Histoire d'Outre Mer et l'Harmattan.
10. Bergeret A., 1995. Les forestiers coloniaux : une doctrine et des politiques qui n'ont cessé de « rejeter de souche ». *In Les Sciences hors d'occident au vingtième siècle*, Paris, ORSTOM éditions.
11. Betsch J.M., 2001. La biodiversité dans les sols forestiers : quelle importance pour le fonctionnement et les usages de la forêt ? *In Bois et Forêts des Tropiques*, n°268 (2), p.p. 69-79.
12. Brown K., Pearce D.W., (eds), 1994. The causes of tropical deforestation : the economic and statistical analysis of factors giving rise to the loss of the tropical forests. Londres, University college Press.
13. C.G.I.A.R., 1996. *Poor Farmers could destroy half of Remaining tropical forest*. Press release, http://www.worldbank.org/html/cgiar/press/forest.html

14. Carrière S.M., 2002. L'abattage sélectif : une pratique agricole ancestrale au service de la régénération forestière. *In Bois et Forêts des Tropiques*, n° 272 (2), p.p. 45-62.
15. Carrière S.M., André M., Letourmy P., Olivier I., McKey D.B., 2002a. Seed rain beneath remnant trees in a slash-and-burn agricultural system in southern Cameroon. *In journal of Tropical Ecology*, vol.18, p.p. 353-374.
16. Carrière S.M., Letourmy P., Mckey D.B., 2002b. Effects of remnant trees in fallows on diversity and structure of forest regrowth in a slash-and-burn agricultural system in southern Cameroon. *In journal of Tropical Ecology*, vol.18, p.p. 375 – 396.
17. Catzeflis F., Lavergne A., 1998. Diversité génétique et diversité taxinomique chez les mammifères : deux apports pour la biologie de la conservation en Guyane française. *In JATBA*, vol. XL, n°1 et 2, p.p. 447-464.
18. Chevalier A., 1920. Exploration botanique de l'Afrique occidentale française. Paris, Ed. Lechevallier.
19. Civilisations, vol. XLIV, n°1-2, 1997. Les peuples des forêts tropicales. Systèmes traditionnels et développement rural en Afrique équatoriale, grande Amazonie et Asie du sud-est. Bruxelles, 255 p.
20. Dominique P.C., Blanc P., Larpin D., Ledru M.P., Riéra B., Sarthou C., Servant M., Tardy C., 1998. Forest perturbations and biodiversity during the last ten thousand years in French Guiana. *In Acta Oecologica*, 19(3), pp. 295-302.
21. Dounias E., 2000. La diversité des agricultures itinérantes sur brûlis, p.p. 65-106. *In Les peuples des forêts tropicales aujourd'hui*, vol.2.
22. Dounias E., 1996. Recrûs forestiers post-agricoles : perceptions et usages chez les Mvae du Sud-Cameroun. *In JATBA*, n° 38, p.p. 153-178.
23. Ducret G., Fotsing J.M., 1987. Evolution des systèmes agraires à Bafou (Ouest-Cameroun). In *Revue de Géographie du Cameroun*, vol. VII, n°1, p.p. 1-8.
24. Dufumier M., 1996. Minorités ethniques et agriculture d'abattis-brûlis au Laos. *In Cahiers des Sciences Humaines,* 32(1), pp.195-208.
25. Durand F., 1994. Les forêts en Asie du sud-est, recul et exploitation. Le cas de l'Indonésie. Paris, L'harmattan, 411 p.
26. Eden M.J., 1996. Environmental degradation and forest renewability in Amazonia, p.p. 48-57. *In Land degradation in the tropics. Environmental and policy Issues*. Edited by Eden, M.J. and Parry.
27. Emperaire L., Lescure J.P., 2000. Activités extractivistes pour gérer la forêt, p.p. 39-52. *In Du bon usage des ressources renouvelables*, Paris, IRD éditions.
28. F.A.O., 1991. *Forest Resources Assessment Project*. Forestry Project Profile n°7, Rome.
29. F.A.O., 1995. Forest resources assessment 1990. Global synthesis. Rome, Etudes FAO-Forêts n° 124.
30. F.A.O., 1997. Situation des forêts du monde 1997. FAO, Rome, 200 p.
31. F.A.O., 1999. *Situation des forêts du monde*, FAO, Rome, 154 p.
32. F.A.O.,1980. Global environment monitoring system. Pilote project on tropical forest cover monitoring. Benin, Cameroon, Togo projet implementation : methodology, results, conclusion. Rome, 99 p.
33. F.A.O., 2001a. *Situation des forêts du monde 2001*. Rome, FAO, 2001. 181 p.
34. F.A.O., 2001b. Comparison of forest area and forest area change estimates derived from FRA 1990 and FRA 2000. Forest resources assessment programme, working Paper n° 59, 69 p.
35. F.A.O., 2001c. *Global forest resources assessment 2000*. Main report. FAO Forestry Paper, n° 140. Rome, FAO, 479 p.
36. Fauroux E., 2000. La forêt dans les systèmes de production ouest-malgaches, p.p. 153-168. In *Du bon usage des ressources renouvelables*, IRD éditions.

37. Fearnside P.M, 1997. Amazonie : la déforestation repart de plus belle. In *La Recherche*, n° 294, pp.44-46.
38. Fearnside P.M., 1991. Développement agricole et déforestation en Amazonie brésilienne. *In Cahiers des Sciences Humaines*, 27 (1-2), p.p. 235-253.
39. Fleury M.-F., 2000. L'exploitation du bois et la déforestation : exemple du Brésil. *In L'information Géographique*, n° 1, p.p. 58-70.
40. Fleury M., Poncy O., 1998. Conserver, gérer la biodiversité : quelle stratégie pour la Guyane ? JATBA, vol. XL, n°1 et 2, 678p.
41. Fotsing J.M., 1992. Croissance démographique et mise en culture des réserves forestières sur les hautes terres de l'Ouest Cameroun. *In Population and deforestation in the humid tropics*. Séminaire Campinas, Brazil, 30 novembre-3 décembre 1992.
42. Fritsch J.M., 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. Paris, ORSTOM Editions, 392 p.
43. Gachet J.P., Toulemonde M., Garganta E., 1993. « Guyane française : une mini-frontière amazonienne. Mouvements migratoires et transformation des systèmes de production agricole, p.p. 187-189. *In Agricultures et paysanneries en Amérique Latine. Mutations et Recompositions*, ORSTOM éditions.
44. Gachet J.P., 1990. D'un système d'élevage introduit dans le cadre d'un plan d'Etat à la diversité des systèmes d'activité agricole en Guyane, p.p. 191-206. *In Agricultures paysannes et développement : Caraïbe, Amérique tropicale*. Actes du troisième Séminaire International du D.A.C.
45. Gély A., 1984. L'agriculture sur brûlis chez quelques communautés d'Amérindiens et de Noirs Réfugiés de Guyane française. *In JATBA*, XXXI, 1-2, pp. 43-71.
46. Gély A., 1986. Agriculture créole ; une étude de cas : Saül (Guyane française). *In JATBA*, XXXIII, pp. 143-192.
47. Grainger A., 1993. *Controlling tropical deforestation*. Londres, Earthscan.
48. Grandisson M., 1997. Gestion des systèmes d'agriculture itinérante sur brûlis dans l'ouest Guyane : contribution à l'étude de la reproductibilité de la fertilité. Thèse de l'Université des Antilles et de la Guyane, 258 p.
49. Grenand P., 1998. Respecter l'homme, respecter la nature : la fin d'un malentendu ? Postface *JATBA*, vol. XL, n°1 et 2, p.p. 659-678.
50. Grenand P., Grenand F., 1990. *Les Amérindiens, des peuples pour la Guyane de demain* : dossier socio-économique, coll. La Nature et l'Homme, IRD Cayenne.
51. Grenand P., Grenand F., 1997. L'occupation amérindienne : ethnoarchéologie, ethnohistoire, p.p. 58-71. *In L'archéologie en Guyane*, édition APPAAG.
52. Grenand F., 1996. L'abattis contre l'essart, again. *In JATBA*, vol. XXXVIII (1), pp. 19-53.
53. Grenand F., Haxaire C., 1977. Monographie d'un abattis Wayapi. *In JATBA*, XXIV, n°4, pp.285-310.
54. Grenand P., 1981. Agriculture sur brûlis et changements culturels : le cas des Indiens Wayapi et Palikur de Guyane. *In JATBA*, XXVIII, 1, pp.23-31.
55. Grenand P., 1996. L'espace indigène face au front pionnier au Brésil, p.p. 191-205. *In Les fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne*.
56. Grenand P., Grenand F., 1996. Il ne faut pas trop en faire. Connaissance du vivant et gestion de l'environnement chez les Wayapi (Amérindiens de Guyane). *In Cahiers des Sciences Humaines*, 32(1), pp.51-63.
57. Grenand P., 2000. Les peuples des forêts tropicales aujourd'hui. Région Caraïbes : Guyanes, Bélize. Bruxelles, APFT-ULB, vol. 4, 478 p.
58. GUYAMAZONE CONCEPTION, 1993. La problématique foncière en Guyane, p.p. 51-59. *In La question foncière en Guyane : retranscription de la visioconférence du 18 septembre 1998* (coord. Taubira-Delannon C.).

59. Houghton R.A., 1996. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *In Ambio*, 25 (4), p.p. 267-272.
60. Houghton R.A., 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use, 1850-1990. *In Chemical and Physical Meteorology*, 51 (2), p.p. 298-313.
61. Hurault J., 1965. La vie matérielle des Noirs Réfugiés Boni et des Indiens Wayana du Haut-Maroni. Paris, Mémoire ORSTOM, n° 3, 142 p.
62. Hurault J., 1972. *Français et Indiens en Guyane*. Cayenne, Guyane Presse Diffusion, 222 p.
63.ICRAF, sans date. Alternatives to Slash-and-Burn Programme. http :www.cgiar.org/ICRAF/sys_wide/asb1.htm
64. Jacques-Félix H., 1947. L'agriculture des Noirs du Cameroun, une forme particulière de l'écobuage. *In L'Agronomie tropicale*, n° 2, p.p. 180-182.
65. Juillerat B., 1983. L'essartage chez les Yafar (Nouvelle-Guinée). *In JATBA*, XXX, 1, pp.3-33.
66. Karsenty A., 1999. Forêts tropicales et mondialisation : les mutations du marché international des bois. *In Autrepart* n° 9, p.p. 121-135.
67. 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 p.
68. Lambin E.F., Rounsevell M.D.A., Geist H.J., 2000. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *In Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 82, p.p. 321-331.
69. 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. *In Global Environmental Change*, n° 11, p.p. 261-269.
70. Ledru M.-P., Blanc P., Dominique P.-C., Fournier M., Martin L., Riera B., Tardy C., 1997. Reconstitution palynologique de la forêt guyanaise au cours des 3000 dernières années. *In C.R. Acad. Sci.*, t.324, série IIa, p.p. 469-476.
71. Léna P., 1986. Aspects de la frontière amazonienne . In *Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 22, n° 3-4, p.p. 319-343.
72. Léna P., 1999. La forêt amazonienne : un enjeu politique et social contemporain. *In Autrepart*, n° 9, p.p. 97-120.
73. Léonard E., Oswald M., 1996. Agriculture forestière sans forêt. Changements agro-écologiques et innovations paysannes en Côte d'Ivoire. *In Natures, Sciences, Sociétés*, 4(3), p.p. 202-216.
74. Lescure J.P., 1986. La reconstitution du couvert végétal après agriculture sur brûlis chez les Wayapi du Haut Oyapock (Guyane française). Thèse de doctorat, Paris VI, 110p.
75. Lescure J.P., 1997. Ruralité ou environnement ? p.p. 83-86. *In La ruralité dans les pays du sud à la fin du XXème S.*, Paris, ORSTOM Editions.
76. Levêque F., 1986. Les processus de formation et les dynamiques des régions pionnières. Le cas de la côte atlantique nicaraguayenne et de l'Amazonie brésilienne. *In Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 22, n° 3-4, p.p. 345-354.
77. Levêque C., 1994. *Environnement et diversité du vivant*. Paris, Cité des Sciences et de l'Industrie, 127 p.
78. Maley J., 1990. L'histoire récente de la forêt dense humide africaine : essai sur le dynamisme de quelques formations forestières, p.p. 367-389. *In faunes, flores, paléoenvironnements continentaux*.
79. Manusset S., 1999. La question des abattis à Saint-Georges de l'Oyapock en Guyane française, p.p. 267-279. In *l'Homme et la forêt tropicale*, Actes du colloque de Marseille.

80. Michon G., De Foresta H., Levang P., 1995. Stratégies agroforestières paysannes et développement durable : les agroforêts à damar de Sumatra. *In Natures, Sciences, Sociétés*, 3(3), pp.207-221.
81. Michon G., Bouamrane M., 2000. Artificialisation et nature. Continuité en agroforêt, p.p. 53-74. *In Du bon usage des ressources renouvelables*, IRD éditions.
82. Michon G., De Foresta H., Levang p., 2000. De la forêt aux jardins (Sumatra, Indonésie), p.p. 224-239. *In Du bon usage des ressources renouvelables*, IRD éditions.
83. Moizo B., 2000. Déforestation et dynamiques migratoires (Madagascar), p.p. 169-185. *In Du bon usage des ressources renouvelables*, IRD éditions.
84. Myers N., 1980. *Conversion of tropical moist forests*. Washington D.C., National Academy of Sciences.
85. ORSTOM-CNRS, 1996. Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux. Actes du symposium ECOFIT de Paris, 335 p.
86. Pasquis R., 1999. La déforestation en Amazonie brésilienne et son impact sur l'environnement. *In Bois et Forêts des Tropiques*, n° 260 (2), p.p. 53-64.
87. Podselver L., 1980. L'essartage et ses implications sur le mode de développement en milieu de forêt tropicale (Amazonie). *In JATBA*, XXVII, 1, p.p. 5-18.
88. Pomel S., Salomon J.N., 1998. *La déforestation dans le monde tropical*. Presses de l'Université de Bordeaux, 160 p.
89. Puig H., 2001a. Diversité spécifique et déforestation : l'exemple des forêts tropicales humides du Mexique. *In Bois et Forêts des Tropiques*, n° 268 (2), p.p. 41-55.
90. Puig H., 2001b. *La forêt tropicale humide*. Paris, Belin, 447p.
91. Roper J., Roberts, R.W.,1999. *Questions de l'heure : Déforestation tropicale : le déclin des forêts tropicales*. http://www.rcfa-cfan.org/french/f.issues.12.html
92. Rossi G. 1999. Forêts tropicales entre mythes et réalités. *In Natures, Sciences, Sociétés*, vol. 7, n°3, p.p. 22-37.
93. Roussel B., 1999. Déforestation des bas-fonds sahélo-soudaniens au Niger central : de la « brousse noire » aux cultures maraîchères. *In Autrepart*, n° 9, p.p. 17-32.
94. Sarrailh J.M., 1990. L'opération ECEREX. Etudes sur la mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Après déboisement. Le point sur les recherches en cours. *In Bois et Forêts des Tropiques*, n° 219, spécial Guyane, p.p. 79-97.
95. Schwartz D., 1997. Forêts et savanes d'Afrique centrale : une histoire holocène mouvementée. Lettre PIGB-PRMC, 6.
96. Smouts, M.C., 2001. Forêts tropicales : jungle internationale. Les revers d'une écopolitique mondiale. Paris, Presses de Sciences Politiques, 349 p.
97. Tardy C., 1996. Indicateurs paléoécologiques/Marqueurs d'anciennes perturbations liées au feu : le cas de la station des Nourragues en Guyane française. *In Atelier MAB*, p.p. 169-187.
98. Taubira-Delannon C., 1998. La question foncière en Guyane : retranscription de la visioconférence du 18 septembre 1998, 70 p.
99. Tsayem Demaze M., Fotsing J.M., Huynh F., 2002. La déforestation dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock (Guyane française). *In Cahiers d'Outre Mer*, 55 (218), mars-juin 2002, p.p. 197-222.
100. Union Européenne, Parlement Européen, 1996. *Les forêts tropicales : menaces et perspectives*. http://www.europarl.eu.int/dg7/forest/fr/sl-3-1.htm.
101. Veldkamp A., Lambin E.F., 2001. Predicting land-use change. *In Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85 (2001), p.p. 1-6.
102. Verdeaux F., Alpha A., 1999. L'économie très politique d'une mise en valeur des ressources forestières : Côte d'Ivoire, 1900-1999. *In Autrepart*, n° 9, pp. 33-51.
103. Waniez P., Brustlein V., De Albuquerque David M., 1999. Les mutations de l'espace agropastoral brésilien, 1975 – 1996. *In Mappe Monde*, 53, 1, pp.26-33.

104. Youta H., Bonvallot J., 1996. La disparition des savanes au Centre-Cameroun entre 1950 et 1990, p.p. 199-200. *In Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*.
105. Youta Happi, J., 1998. Arbres contre graminées : la lente invasion de la forêt par la savane au Centre - Cameroun. Thèse de Doctorat, Paris IV, 240 p.

II. Références se rapportant à la télédétection

106. Achard F., Eva H., Glinni A., Mayaux P., Richards T., Stibig H.J., 1998. Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics. TREES Publications Series B, n° 4, European Commission, Luxembourg.
107. Achard F., Eva H., Mayaux P., 2001. Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data : production and accuracy assessment issues. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 14, p.p. 2741-2762.
108. Adragna F., 1997. Interférométrie radar : principe, applications et limitations. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 148, p.p. 15-19.
109. Anys H., He D.C., Wang L., Gwyn Q.H.J., 1994. Classification d'images radar aéroporté multipolarisation en milieu agricole. *In International Journal of Remote Sensing*, vol.15, n°18, p.p. 3831-3838.
110. 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
111. Baret F., Bruno A., 1994. Intérêt du moyen infrarouge réflectif pour caractériser la végétation. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 136, p.p. 8-22.
112. Beaudoin A., Hardy S., Deshayes M., Le Toan T., Girou D., 1993. Use of airborne SAR data for the mapping of shifting cultivation in french Guiana". *In Proceedings Workshop SAREX-92*, p.p. 185-191.
113. Beaudoin A., Castel T., Rabaute T., 1997. Forest monitoring over hilly terrain using ERS INSAR Data. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, p.p. 105-115.
114. Blasco F., 1990. Guidelines on use of Landsat and Spot for Land use and forest change. Provisionnal version, Rome, FAO, 63 p.
115. Bouazzaoui N., Chahin N., Belaïd Aït M., Ahlafi Z., Bijaber N., El Kaker A., 2001. Mise en oeuvre d'un système d'information géographique pour le suivi de la forêt de la Maâmora au Maroc. *In TELEDETECYION*, vol. 2, n° 2, p.p. 137-149.
116. Bouix T., 1998. Conception d'un indice de fragilité des forêts pour la gestion de l'environnement dans les hautes terres du Vietnam. Le système d'information géographique comme outil d'aide à la décision. Mémoire de DEA, Laboratoire ERMES/Université d'Orléans.
117. Bourgeaud M., 1997. On the use of ERS SAR interferometry for the retrieval of geo-and bio-physical information. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, pp.83-94.
118. Cantou J.P., Tonon M., 1997. Cartographie radar de la Guyane : vers une chaîne de production opérationnelle de spatiocartes. In *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 148, p.p.36-43.
119. Carvalho L.M.T., Fonseca L.M.G., Murtach F., Clevers J.G.P.W., 2001. Digital change detection with the aid of multiresolution wavelet analysis. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 18, p.p. 3871-3876.
120. Charron C., 1994. Mise à jour du SIG de la région de Kourou (Guyane) à partir de l'imagerie Spot. Rapport de recherche, centre ENGREF de Kourou, 24 p.

121. Chavez Jr., S., Sides S.C., Anderson J.A., 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and SPOT panchromatic. *In Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n° 3, p.p. 295-303.
122. Chen Xiuwan, 2002. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n° 1, p.p. 107-124.
123. Cohen M., Hotyat M., 1995. Embroussaillement et boisement sur le Causse Méjan entre 1965 et 1992 : une approche par photo-interprétation diachronique. *In Grands Causses : nouveaux enjeux, nouveaux regards*, Editions Causses et Cévennes.
124. Coppin P.R., Bauer M.E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *In Remote Sensing Reviews*, n° 23, p.p. 207-234.
125. Crampe F., 1998. Surface change detection from interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) observations. Mémoire de DEA « Sciences et Techniques Spatiales », JET Propulsion Laboratory/NASA, 29 p.
126. D'Souza J.C., Malingreau J.P., 1993. NOAA-AVHRR studies of vegetation characteristics and deforestation mapping in the Amazon Basin. *In Remote Sensing Reviews*
127. De Cauwer V., 1994. Projet pan Amazonia : deuxième phase en Guyane française. ENGREF, centre de Kourou, 54 p.
128. De Hauteclocque H., 1997. Cartographie radar de la Guyane française. In *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 148, p.p. 31-35.
129. Donnay J.P. (éditeur scientifique), 2000. *La spatiocartographie*. Numéro spécial du *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, vol. 38, n°1, 136 p.
120. 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.
131. Dwivedi R.S., Ravi-Sankar T., 1991. Monitoring shifting cultivation using space-borne multispectral and multitemporal data. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n° 3, pp. 427-433.
132. Eden M.J., 1986. Monitoring indigenous shifting cultivation in forest areas using aerial photography and Landsat, p.p. 255-277. In *Remote sensing and tropical land management*, (eds: Eden M.J., Parry J.T.), Wiley and sons.
133. F.A.O, 1990. *Méthode d'évaluation : manuel de procédure pour l'interprétation et la compilation des données satellitaires haute résolution pour l'évaluation de l'état de la couverture forestière et des changements*. Rome, 33p.
134. F.A.O., 1996. *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*, FAO forestry paper n° 130. Rome, 1996, 154 p.
135. Feugier P., 1993. Le SIG des périmètres agricoles de Guyane française. Etude de la mise à jour de l'occupation du sol d'après l'imagerie satellite Landsat. ENGREF, centre de Kourou, 47 p.
136. Fisher P.F., Pathirana S., 1993. The ordering of multitemporal fuzzy land-cover information derived from Landsat MSS data. *In Geocarto*, vol. 8, n° 3, p.p. 5-14.
137. Fotsing J.M., 1998. *Les paysages Bamiléké : approche géographique des dynamiques rurales par télédétection*. H.D.R. de Géographie et Environnement, Université de Paris IV - Sorbonne, 2 vol. + un atlas.
138. Franklin S.E., Moskal L.M., Lavigne M.B., Pugh K., 2000. Interpretation and classification of partially harvested forest stands in the Fundy Model Forest using multitemporal Landsat TM digital data. *In Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n° 4, p.p. 318-333.

139. Geist H.J., Lambin E.F., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *In BioScience*, vol. 52, n° 2, p.p. 143-150.
140. Girou D., Deschamps J., Delorme M. 1998. Apports et limites de la télédétection aérienne et satellitale pour la gestion des milieux naturels en Guyane : exemple de zonage écologique de la région de Saül. *In JATBA*, vol. XL, n°1 et 2, p.p. 423-432.
141. Gond V., sous presse. Eastern Guiana shield land cover classification using SPOT-4/VEGETATION instrument.
142. Green K., Kempka D., Lackey L., 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *In Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 3, p.p. 331-337.
143. Guerra F., Puig H., Dessay N., 1998. Synergie entre imagerie optique multidate et relevés ponctuels de terrain pour le développement d'un modèle de succession végétale en forêt amazonienne, p.p. 191-198. *In La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Ed. AUPELF-UREF.
144. Hayes D.J., Sader S.A., 2001. Compararison of change-detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. *In Phtogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, n° 9, p.p. 1067-1075.
145. Hobbs S., 1997. Weather Effects on SAR Backscatter for Agricultural Surfaces. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, pp.179-188.
146. Hotyat M., Veyret Y., 1991. Couverts forestiers et enfrichement en Auvergne. L'apport de la téléanalyse. *In Bulletin de l'Association des Géographes Français*, vol. 68, n° 1, p.p. 57-65.
147. Hubschman J., 1994. Observation multi-échelles des écosystèmes : approche hiérarchique et couplage avec les mesures par télédétection. Rapport, 23 p.
148. Hubschman J., Selleron G., 1991. Monitoring forest environment from SPOT data. Three case studies. Communication au binational french-israeli conference on remote sensing, Hertzlya., p.p. 162-174.
149. Hubschman J. ; Moreira M.A., 1990. L'écosystème des caatingas : les paysages du sisal dans l'Etat de Bahia (Brésil), p.p. 59-72. *In Télédétection et tiers monde*, éditions du CNRS
150. Iltis J., Pasqualini V., Korber D., Lointier M., 2001. Utilisation de données mutlidates Spot-XS pour l'évaluation de l'impact d'une ferme aquacole sur la dynamique écologique d'un delta tropical. Un exemple dans le Nord-Ouest de Madagascar. *In Bulletin de la Société française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 161, p.p. 56-62.
151. Imbernon J., 1999a. A comparison of the driving forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon. *In Ambio*, vol. 28, n° 6, p.p. 509-513.
152. Imbernon J., 1999b. Changes in agricultural practice and landscape over a 60-year period in North Lampung, Sumatra. *In Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 76, p.p. 61-66.
153. Imbernon J., 1999c. Pattern and development of land-use changes in the Kenyan highlands since the 1950s. *In Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 76, p.p. 67-73.
154. Imbernon J., 2000. Déforestation et pression démographique au Rondônia, Brésil. *In Bois et Forêts des Tropiques*, n° 266 (4), p.p. 23-33.
155. Imbernon J., Branthomme A., 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *In International Journal of Remote Sensing*, 2001, vol. 22, n° 9, p.p. 1753-1765.
156. Jaakkola S. 1990. Managing data for the monitoring of tropical forest cover : the global resources information data base approach. *In Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56 n°10 pp 1355-1357.

157. Karimoune S., Alexandre J., Ozer A., 1993. Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). *In Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*, AUPELF-UREF/PUQ, p.p. 151-159.
158. Lambin E. F., 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *In Progress in Physical Geography*, 21 (3), p.p. 375-393.
159. Lambin E.F., 1988. Apport de la télédétection satellitaire pour l'étude des systèmes agraires et la gestion des terroirs en Afrique Occidentale. Thèse de troisième cycle, U.C.L.
160. Lambin E.F., Ehrlich D., 1997. The identification of tropical deforestation fronts at broad spatial scales. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 17, pp. 3551-3568.
161. Lambin E.F., Strahler A.H., 1994a. Change-vector analysis in multitemporal space : a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. *In Remote Sensing of Environment*, n° 48, p.p. 231-244.
162. Lambin E.F., Strahler A.H., 1994b. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, n° 10, p.p. 2099-2119.
163. Laporte N., Justice C., Kendall J., 1995. Mapping the dense humid forest of Cameroon and Zaire using AVHRR satellite data. *In* International *Journal of Remote Sensing*, vol.16, n°6, p.p. 1127-1145.
164. 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. *In International Journal of Remote sensing*, vol.19, n° 18, p.p. 3537-3550.
165. Le Tourneau F.M., Poccard Chapuis R., Rudant J.P., 1999. Interprétation d'images radar sur l'île d'Algodoal (Para – Brésil) en vue d'une cartographie des milieux naturels du littoral amazonien. In *TELETEDECTION*, vol. 1, n° 1, p.p. 1-18.
166. Lillesand T.M., Keifer R.W., 1994. *Remote sensing and image interpretation*, 3rd edition, New York, John Wiley and Sons.
167. Liverman D., Moran E.F., Rindfuss Stern, P.C., (editors), 1998. *People and pixels. Linking remote sensing and social science*. Washington D.C., National Research Council, 244p.
168. Lunetta R.S., Elvidge C.D., 1998. Remote sensing change detection. Environmental monitoring methods and applications. Ann Arbor Press, 318 p.
169. Malingreau J.P., Tucker C.J., Laporte N., 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *In International Journal of Remote Sensing*, vol.10, n° 4-5, pp. 855-867.
170. Mangolini M, Ranchin T., Wald L., 1993. Fusion d'images SPOT multispectrale (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. *In De l'optique au radar, les applications de Spot et ERS,* p.p. 199-207. Paris, CNES-ESA.
171. Mas J.F., 1998. Suivi et analyse de la déforestation par télédétection multidate et utilisation d'un système d'information géographique: le cas du Sud-Est du Mexique. Thèse de l'Université Paul-Sabatier, Toulouse, France, 204 p.
172. Mas J.F., 1999. Monitoring land-cover changes : a comparison of change detection techniques. *In Intenational Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n° 1, p.p. 139-152.
173. 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.
174. Massart M, Pétillon M., Wolff E., 1995. The impact of an agricultural development project on a tropical forest environment : the case of Shaba (Zaire). *In Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 9, p.p. 1153-1158.
175. Mayaux P., Achard F., Malingreau J.P., 1998. Global tropical forest area measurements derived from coarse resolution maps at a global level : a comparison with other approaches. *In Environmental Conservation*, n° 25, p.p. 37-52.

176. Mayaux P., Gond V., Bartholomé E., 2000. A near-real time forest-cover map of Madagascar derived from Spot-4 VEGETATION data. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, n° 16, p.p. 3139-3144.
177. Mayaux P., Lambin E.F., 1997. Tropical forest area measured from global land-cover classifications : inverse calibration models based on spatial textures. *In Remote Sensing of Environment*, 57, p.p. 29-43.
178. MCCracken 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. *In Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, n° 11, p.p. 1311-1320.
179. Mertens B., Sunderlin W., Ndoye O., Lambin E.F., 2000. Impact of macroeconomic change on deforestation in South Cameroon : integration of household survey and remotely-sensed data. *In World Development*, vol. 28, n° 6, p.p. 983-999.
180. Mertens B., Lambin E. F., 1997. Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon. *In Applied Geography*, vol. 17, n° 2, p.p. 143-162.
181. Mertens B., Lambin E. F., 2000. Land cover change trajectories in Southern Cameroon. *In Annals of the Association of American Geographers*, 90 (3), 2000, p.p. 467-494.
182. Mertens B., Forni E., Lambin E., 2001. Prediction of the impact of logging activities on forest cover : a case-study in the East province of Cameroon. *In Journal of Envionmental Management*, 62, p.p. 21-36.
183. Michener W.K., Houhoulis P.F., 1997. Detection of vegetation changes associated with extensive flooding in a forested ecosystem. *In Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, n° 12, p.p. 1363-1374.
184. Milne A.K., O'Neill A.L., 1990. Mapping and monitoring land cover in the Willandra lakes world heritage region. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n° 11, p.p. 2035-2049.
185. 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.
186. Mumford B., Muller J.-P., Mandanayake A., 1997. Assessment of land cover mapping potential in Africa using tandem ERS interferometry. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, pp. 135-150.
187. N'Guessan E.,1993. Suivi par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide soumise à des pressions agricoles, p.p. 263-271. *In Télédétection et cartographie*, AUPEF-UREF.
188. N'Guessan E.K., 1990. Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection, p.p. 181-196. *In Télédétection et Séchéresse*, Ed. AUPELF-UREF/John Libbey Eurotext.
189. Naceur M.S., Belhadj Z., Boussema M.R., 2000. Fusion de données satellites basée sur la théorie de Dempster-Shafer pour la cartographie de l'occupation du sol en milieu semi-aride. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 158, p.p. 3-11.
190. Panapitukkul Nipa, 1994. Contribution de la télédétection spatiale à la caractérisation des systèmes de production agricole en Thaïlande du Sud. Thèse, Université de Toulouse le Mirail, 194 p.
191. Pohl C., Van Genderen J.L., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing : concepts, methods and applications. *In Intenational Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 5, p.p. 823-854.
192. Polidori L., 1997. *Cartographie radar*. Gordon and Breach Science Publishers, 287p.
193. Polidori L., Toutin T., 1998. Cartographie du relief par imagerie radar : l'état de l'art. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 152, 4, p.p. 12-23.

194. Polidori L., Archambault F.X., Kasser M., 1997. SAR Interferometric DEM quality assessment. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, pp. 57-60.
195. 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.
196. Ponsard C., Kremer P., Guissard A., Wilmet J., 1995. *Etude de la forêt tropicale à l'aide du radar à ouverture synthétique d'ERS-1*. Rapport final de recherche TELSAT III/10/017. Université Catholique de Louvain.
197. Pouyllau M. (Sous la direction de), 1990. Télédétection et tiers monde. Méthodologies, pratiques, nouveaux champs et nouveaux enjeux. Bordeaux, CNRS-CEGET, 394 p.
198. Pouyllau M., Le Men H., Pouyllau D., 1990. Cartographie agro-écologique des LLanos occidentaux du Vénézuela à petite et moyenne échelle : paysages et évolutions 1979, 1982, 1987 (Landsat et Spot), p.p. 23-46. *In Télédétection et tiers monde*.
199. Prosisy C., 1995. Télédétection radar pour le suivi et l'aménagement de la forêt guyanaise. Analyse des données SAREX pour la cartographie des abattis et de la déforestation. Rapport ENGREF, centre de Kourou, tome 1, 32 p.
200. Puig H., Guelly A. K., 1996. Apports de la télédétection à l'étude de la reconquête forestière dans quelques savanes de l'Afrique de l'Ouest, p.p. 167-169. *In Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*.
201. Racaut C., 1991. *Méthodologie d'extraction semi - automatique des abattis à partir des images satellite Spot*. Mémoire de mastère en Sciences Forestières, centre ENGREF de Kourou, 60 p.
202. Reich M., Wehr A., 1997. The use of interferometry results with other remote sensing data in the EMAP-project. *In Actes Fringe 96 Workshop : ERS SAR Interferometry*, Zurich, pp.123-133.
203. Ribbes F., 1994. Une nouvelle méthode de classification des images satellites en milieu tropical : l'analyse des mélanges spectraux. Mémoire d'Ingénieur, Ecole Supérieure d'Agronomie de Purpan/Toulouse.
204. Rogan J., Franklin J., Roberts D.A., 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *In Remote Sensing of Environment*, n° 80, p.p. 143-156.
205. Roy P.S., Tomar S., 2001. Landscape cover dynamics pattern in Meghalaya. *In Intenational Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 18, p.p. 3813-3825.
206. Rudant J.P., De Hauteclocque H., Pénicand C., 1997. Potentiel d'exploitation des spatiocartes radar : exemple de la Guyane. *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 148, p.p. 44-56.
207. Runge J., Neumer M., 1996. Landscape dynamics of the rain forest/savana border from 1955 to 1990 evidenced by aerial photographs and Landsat - TM data in Northern Zaire, p.p. 171-173. *In Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*.
208. Sabatier D., 1993. Evaluation des possibilités de détection des variations spatiales du couvert forestier par imagerie radar en bande C (ERS 1) d'après des vérités terrain de Guyane française. Rapport préliminaire. ORSTOM, MAA, 4 p.
209. Sader S. A., 1995. Spatial characteristics of forest clearing and vegetation regrowth as detected by Landsat Thematic Mapper Imagery. *In Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, 9, pp. 1145-1151.
210. Sader S. A., Hayes D. J., Hepinstall J.A., Coan M., Soza C., 2001. Forest change monitoring of a remote biosphere reserve. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 10, p.p. 1937-1950.

211. Sader S.A., Winne J.C., 1992. RGB-NDVI colour composites for vizualizing forest change dynamics. *In Intenational Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 16, p.p. 3055-3067.
212. Selleron G., 1995. De Landsat-MSS a Spot : 14 années de déforestation continue sur un front pionnier vénézuélien. *In Photo-interprétation*, n°2, p.p. 97-108.
213. Singh A., 1986. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat, p.p. 237-253. *In Remote sensing and tropical land management* (editors : Eden M.J., Parry J.T.), Wileys and Sons.
214. Smith G., Askne J., 2001. Clear-cut detection using ERS interferometry. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 18, p.p. 3651-3664.
215. Stibig H.J., Malingreau J.P., Beuchle R., 2001. New possibilities of regional assessment of tropical forest cover in insular Southeast Asia using SPOT-VEGETATION satellite image mosaics. *In International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 4, p.p.503-505.
216. Strozzi T., Wegmüller U. 1997. Applications de l'interférométrie RSO pour l'étude de l'occupation des sols, *In Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection,* n° 148, pp. 114-119.
217. TREES, 1998. *Vegetation map of South America at 1 : 5 000 000*. TREES publications, Series D2, Luxembourg, European Commission.
218. Tricart J., 1992. Ce qu'apporte la télédétection à la connaissance du milieu et pour sa gestion, particulièrement en Amazonie : l'expérience de Radambrasil. In Bulletin de l'Association des Géographes Français, n°5, p.p. 403-421.
219. Trichon V., Guillemyn D., Fromard F., Betoulle J.-L., Puig H., 1998. La photographie aérienne à grande échelle : un outil pour l'analyse de la diversité en forêt guyanaise. *In JATBA*, vol. XL, n°1 et 2, p.p. 405-422.
220. Tsayem - Demaze M., 1998. La dynamique de l'occupation de l'espace dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock (Guyane française) : cartographie par télédétection et SIG. Mémoire de DEA, Université d'Orléans, Laboratoire ERMES de l'IRD, 63 p.
221. 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.
222. Tsayem M. 1999. SIG et cartographie de l'occupation du sol : l'exemple de Saint-Georges de l'Oyapock en Guyane française. *In Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, vol.4, n°10, p.p. 289-295.
223. 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.
224. Wang F., 1993. A knowledge-based vision for detecting land changes at urban fringes. *In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, n° 1, p.p. 136-145.
225. Woodcock C.E., Macomber S.A., Pax-Lenney M., Cohen W.B., 2001. Monitoring large areas for forest change using Landsat : generalization accross space, time and Landsat sensors. *In Remote Sensing of Environment*, n° 78, p.p. 194-203.
226. 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.

III. Références à caractère général

227. Achoundong G., Youta H., Bonvallot J., 1993. Contacts forêt - savane au Cameroun et *Chromoleana odorata* ; considérations préliminaires. Comm. thirth int. workshop on biological control and management of *Chromoleana odorata*, Abidjan, 12p.
228. Bertrand G. 1975. Pour une histoire écologique de la France rurale. *In Histoire de la France rurale*. Paris, Le Seuil.
229. Boserup E., 1965. The conditions of agricultural growth : the economics agrarian change under population pressure. Londres, Allen and Unwin.
230. Brunet R., Feras R., Théry H., 1998. *Les mots de la Géographie. Dictionnaire critique*. Troisième édition, Paris, RECLUS/La Documentation Française, 518 p.
231. Derruau M., 1999. *Géographie humaine*. A. Colin, 7ème édition, 447 p.
232. Diry J.P., 1999. *Les espaces ruraux*. Paris, SEDES, 189 p.
233. Droulers M., 1995. *L'Amazonie*. Paris, Nathan Université, 188 p.
234. Ehrlich P., 1968. *The population Bomb*. Ballantine Books, New York.
235. E.P.A.G., 1999. *Projets d'aménagement en secteur rural*. Note de cadrage. 19 p.
236. European Environment Agency, 1999. *Environmental indicators : typology and overview*. Technical report n° 25, 19 p.
237. Fonds Mondial pour la Nature, 1994. The status of old growth and semi-natural forests in Western Europe. Gland, WWF, Suisse.
238. France-Guyane, 1999. n°3731, 8 juillet.
239. Friedberg C., 1996. Forêts tropicales et populations forestières : quelques repères. *In Natures, Sciences, Sociétés*, 4(2).
240. Gombault P., Gachet J.-P., Michalon T., 1998. *Guyane 1998. Guide permanent des publications*, Cayenne : SEPANGUY, Silvolab, IRD, CNES, 108 p.
241. Larousse, 1999. Le Petit Larousse Compact 2000, 1784 p.
242. Mazoyer M., Roudart L., 1997. Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine. Paris, Editions du Seuil, 533 p.
243. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W., 1972. *Halte à la croissance*. Paris, Fayard.
244. Orru J.F., 1998. L'activité aurifère dans la commune de Maripasoula, impact écologique et humain. *In JATBA*, vol. 40 (1-2), p.p. 147-166.
245. Orru J.F., 2001. Les communautés isolées de Guyane et la France, de la colonisation à la globalisation. Thèse de l'université de Paris III, 3 vol., 633 p.
246. Orru J.F., 2001. Typologie des exploitations aurifères de Guyane et spécificités du contexte socio-économique local, p.p. 425-446. *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, p.p. 425-446.
247. Piantoni F. 1998. Rupture territoriale et comportements démographiques endogènes : processus de territorialisation de l'espace frontalier Maroni (Surinam/Guyane française) depuis 1986. Communication présentée au colloque international de l'Association des Démographes de Langue Française, La rochelle, 22-26 septembre 1998, 15 p.
248. Piantoni F., 1999. La migration surinamaise dans le nord-ouest guyanais : analyse du processus de territorialisation du milieu rural depuis 1986. Communication présentée au symposium international *Migration : Nation, Place and Territorial Dynamics*, 19-25 avril 1999, Sao Paulo, Brasil, 15 p.
249. Piantoni F., 2002. Pouvoir national et acteurs locaux : l'enjeu des mobilités dans un espace en marges. Le cas de la Guyane française. Thèse de l'université de Poitiers, 474 p.
250. Repin Dr. 1863. *Voyage au Dahomey*. Le tour du monde, n° 162-163.

251. Rossi G., 2000. L'ingérence écologique. Environnement et développement rural du Nord au Sud. Paris, CNRS Editions, 246 p.
252. SCEES, 1983. Recensement général de l'agriculture 1979-1980. Premiers résultats Guyane. 23 p.
253. SCEES, 1993. Recensement agricole 1988-1989. Guyane, principaux résultats. Agresté, n°1, 27 p.
254. SCEES, 1996. Recensement agricole 1993/1995. L'agriculture en Guyane, 1993/1995. Agresté, n°1, 32 p.
255. SCEES, 2001. Recensement agricole 2000. Résultats provisoires. Cayenne, DAF Guyane.
256. Simon J., 1985. L'Homme, notre dernière chance. Paris, PUF.
257. Tchawa P., 1991. Dynamique des paysages sur la retombée méridionale des Hauts Plateaux de l'Ouest-Cameroun. Thèse de Doctorat de l'université de Bordeaux 3, 400 p.
258. Tchawa P., 1997. Evolution des techniques traditionnelles de gestion des sols et développement durable : enseignements tirés de l'étude de deux terroirs bamiléké (Ouest-Cameroun). *In Cahiers d'Outre-Mer*, vol. 50, n° 197, p.p. 69-86.
259. Tchawa P., Tsayem Demaze M., 2002. Gestion de l'espace et effets écologiques de l'eucalypculture en pays Bamiléké (Ouest-Cameroun) : stratégie paysanne et prise en compte d'un risque perçu. *In Cahiers d'Outre-Mer*, vol. 55, n° 218, p.p. 175-196.
260. Tiffen M., Mortimore M., Gichuki F., 1994. More people, less erosion : environmental recovery in Kenya. John Wileys, Chichester.
261. Verdeaux F., 1999. Introduction : Discours global et réalités locales, p.p. 5-13. In *La forêt-monde en question*, *Autrepart*.
262. Zonzon J., Prost G., 1997. Géographie de la Guyane, Paris : Maisonneuve et Larose-Servedit, 143 p.

SIGLES ET ACRONYMES

ACDI : Agence Canadienne pour le Développement International
ACP : Analyse en Composantes Principales
ADEn : Aménagement, Développement, Environnement
APT : Automatic Picture Transmission
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer
BP : Before Present
CASI : Compact Airborne Spectrographic Imager
CD : Chemin Départemental
CES : Conservation de l'Eau et du Sol
CGIAR : Consultative Group on International Agricultural Research
CIES : Centre International des Etudiants et Stagiaires
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CSG : Centre Spatial Guyanais
DAF : Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts
DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies
DEUG : Diplôme d'Etudes Universitaires Générales
ECOFIT : ECOsystèmes et palé-écosystèmes Forestiers InterTropicaux
EGIDE : acronyme de l'ex-CIES
ENVISAT : ENVIronment SATellites
EPAG : Etablissement Public d'Aménagement de la Guyane
ERMES : Enseignement et Recherche sur les Milieux et les Sociétés
ERS : European Remote Sensing Satellite
ESA : European Space Agency
ETES : Espace, Temps et Société
ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus
FAO : Food and Agriculture Organization
GAC : Global Area Coverage
GEPRE : Gestion de l'Eau et PRotection de la REssource
GPS : Global Positioning System
HDR : Habilitation à Diriger les Recherches
HRG : Haute Résolution Géométrique
HRPT : High Resolution Picture Transmission
HRS : Haute Résolution Spatiale
HRV : Haute Résolution dans le Visible
HRVIR : Haute Résolution le Visible et l'IfraRouge
ICRAF : International Centre for Research on Agriculture and Forestry
IGN : Institut Géographique National
ILU : Interferometric Land Use
INCRA : Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire
INPE : Institut National de Recherche Spatiale
INSEE : Institut National de Statistiques et d'Etudes Economiques
IPCC : International Panel on Climate Change
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
IRS : Indian Remote Sensing Satellite
ITS : Intensité, Teinte, Saturation
JERS : Japanese Earth Resources Satellite
LAC : Local Area Coverage
Landsat : Land Resources Satellite

LRT : Laboratoire Régional de Télédétection
MIR : Moyen InfraRouge
MSS : MultiSpectral Scanner
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
ONG : Organisation Non Gouvernementale
ORSTOM : Office de Recherche Scientifique et Technique Outre Mer
P : panchromatique ; un seul canal ou bande spectrale
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PPDS : Populations Provisoirement Déplacées du Surinam
RADAM : RADar d'AMazonie
Radarsat : Radar satellite
RVB : Rouge, Vert, Bleu
SAR : Synthetic Aparture Radar
SERG : Société d'Etudes et de Recherches Géogr
SIG : Système d'Information Géographique
SOFT : SOl Forestiers tropicaux
SOR : Système Observé Régional
Spot : Système Probatoire d'Observation de la Terre, devenu Satellite Pour l'Observation de la Terre
TM : Thematic Mapper
TREES : Tropical REsources and Environment observations by Satellites
U.E. Union Européenne
UICN : Union International pour la Conservation de la Nature
US ESPACE : Unité de Service Expertise et SPAtialisation des Connaissances en Evironnement
USGS : United States Geological Survey
UTM : Universal Transverse MErcator
WWF : World Wide Found for Nature
Xi : multispectral band (4 canaux pour les images Spot 4 et Spot 5)
XS : multispectral band (3 canaux pour les images Spot 1 à Spot 3)

LISTE DES FIGURES

1. Organigramme synthétique de l'étude……..……20
2. Répartition des forêts dans le monde……33
3. Modélisation des processus de déforestation tropicale et intégration des modèles à l'échelle régionale…….51
4. Formes de déforestation résultant d'opérations concertées et non concertées d'occupation agricole du sol en forêt amazonienne……52
5. Les défrichements agricoles au sein de la forêt amazonienne……...69
6. Mise en place et évolution des défrichements agricoles en forêt amazonienne…...……...70
7. Calendrier annuel des opérations d'abattis à Saint-Georges de l'Oyapock……..76
8. Formes et tailles de quelques abattis de la région de Saint-Georges……79
9. La Guyane française : localisation des sites étudiés……81
10. Accroissement de la population et des densités démographiques en Guyane française de 1946 à 1999……...83
11. Croissance démographique à l'échelle des communes de la Guyane française : la dissymétrie zone littorale/zone intérieure……...83
12. Evolution du nombre d'abattis par rapport au nombre total d'exploitations agricoles en Guyane française entre 1980 et 2000……94
13. De l'itinérance à la sédentarisation : diversification du paysage agraire en Guyane française…….95
14. Les défrichements agricoles vus par le capteur CASI au lieu-dit Marguerite……..109
15. Exemples de compositions colorées réalisées par permutation des canaux dans le plan RVB……113
16. Composition colorée mettant en évidence les empreintes anthropiques dans la région de Mariapsoula en 1998……..114
17. Méthode d'analyse des abattis et de l'évolution de l'occupation du sol à partir des photos aériennes de la région de Saint-Georges de l'Oyapock……...117
18. Composition colorée multi-date montrant l'évolution des défrichements agricoles dans la région de Charvein entre 1992 et 1999…….122
19. Composition colorée multi-date associant les composantes principales de deux images Landsat TM : Mise en évidence de l'évolution des fronts pionniers dans le Nord du Para entre 1988 et 1998……124
20. L'approche hiérarchique descendante pour une caractérisation de plus en plus affinée……..131
21. Détection et identification des fronts pionniers sur une image NOAA AVHRR….……133
22. Détection et identification des fronts pionniers sur une image Spot 4 VEGETATION...134
23. Illustration de la sous-région du Centre du Para et situation des scènes Spot et TM utilisées pour caractériser les fronts pionniers…….137
24. Structure et organisation des fronts pionniers : caractérisation du parcellaire au niveau sous-régional à partir d'images Landsat TM et Spot Xi……..……..…138
25. Détection et identification des abattis au niveau sous-régional à partir d'images Landsat TM et Spot…….141
26. Comportement spectral des types d'occupation du sol à Charvein ……..142
27. Typologie et emprise spatiale des abattis de Charvein d'après la classification dirigée de l'image Spot 4 HRVIR……...……143
28. Structuration de l'occupation du sol en auréoles autour du bourg de Maripasoula : Mise en évidence à partir d'une image Spot XS……146
29. Les défrichements agricoles et l'occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock d'après Spot XS…….147

30. Les empreintes anthropiques et les couverts végétaux vus par les capteurs radar : l'exemple du site de Charvein ……...149
31. Identification des abattis par interprétation de la mosaïque des photos aériennes de 1997 sur la commune de Saint-Georges de l'Oyapock…….…152
32. Abattis et occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock : organisation par rapport au relief…….153
33. Variabilité de la surface des abattis de 1998 et 1997 à Saint-Georges…….154
34. Organisation de l'occupation du sol autour du bourg de Saint-Georges……..159
35. Organisation de l'occupation du sol autour des routes à Saint-Georges de l'Oyapock..160
36. L'approche hiérarchique ascendante pour détecter les changements d'occupation du sol et analyser l'évolution des défrichements agricoles du niveau local au niveau régional……..163
37. Évolution de l'occupation du sol entre 1958 et 1998 à Saint-Georges de l'Oyapock……165
38. Occupation du sol à Saint-Georges de l'Oyapock en 1987……...167
39. Dynamiques spatiales à Saint-Georges de l'Oyapock entre 1958 et 1998……..172
40. L'évolution des défrichements agricoles entre 1987 et 1999 à Charvein : mise en évidence à partir d'une composition colorée multidate d'images MSS, TM et Spot XS……176
41. Classification conjointe de deux images (TM et Spot XS) pour quantifier l'évolution des défrichements entre 1992 et 199 à Charvein……..178
42. L'extension des fronts pionniers entre 1988 et 1998 dans le Para : suivi à partir d'une composition colorée multidate d'images Landsat TM……180
43. L'évolution des fronts pionniers dans le Para entre 1988 et 1998 : quantification à partir des classifications séparées de deux images Landsat TM……181
44. Détection des zones défrichées en Amazonie brésilienne en 1996 à partir d'images Landsat TM……184
45. Evolution des surfaces totales défrichées en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996..185
46. Evolution des défrichements annuels en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996……185
47. Probabilité d'acquisition mensuelle d'une scène Landsat TM avec une couverture nuageuse inférieure ou égale à 30 % en Amazonie brésilienne…….194
48. Probabilité d'acquisition annuelle d'une scène Landsat TM de couverture nuageuse inférieure ou égale à 10 % et 30 % en Amazonie brésilienne…….195
49. Réduction de la couverture nuageuse par raccordement de deux images Spot 4 VGT...197
50. Synthèse multidate pour remplacer les pixels nuageux sur les images Spot 4 VEGETATION……..198
51. Méthode de fusion d'images par transformation RVB-ITS-RVB…….200
52. Fusion des photographies aériennes avec une image Spot XS pour améliorer l'identification visuelle des types d'occupation du sol à Saint-Georges……..201
53. Fusion d'images radar pour améliorer la visu-interprétation de l'occupation du sol à Charvein……..203
54. Stratégie proposée pour la surveillance de l'environnement forestier amazonien par télédétection……....206

LISTE DES TABLEAUX

1. Importance économique des produits forestiers tropicaux……23
2. Revue de l'évaluation des superficies forestières de l'année 1990……27
3. 50 ans d'évaluation des superficies forestières par la FAO……29
4. Evaluations des superficies forestières mondiales entre 1961 et 1979……...31
5. Evaluations de l'étendue des forêts et de la déforestation tropicales
entre 1970 et 1980……..31
6. Répartition des types de forêt par continent…….32
7. Evolution des superficies forestières mondiales entre 1980 et 1990……..35
8. Evolution des superficies forestières mondiales entre 1990 et 2000……..35
9. Superficies des forêts tropicales obtenues par inventaires forestiers et par
traitements d'images NOAA AVHRR……...39
10. Comparaison des superficies forestières tropicales obtenues par télédétection et
inventaires classiques en 2000…….39
11. Comparaison de l'étendue de la déforestation tropicale mesurée
par télédétection et par inventaires classiques en 2000……...40
12. Principaux modèles de déforestation……...49
13. Répartition des forêts situées dans les aires protégées suivant les zones écologiques 57
14. Population des régions forestières et ethnies pratiquant
l'agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis……64
15. Diversité des plantes cultivées par les ethnies autochtones
des régions forestières tropicales……64
16. Surfaces moyennes de l'abattis dans quelques communautés de
la Guyane française……...78
17. Croissance démographique en Guyane française de 1946 à 1999……85
18. Evolution de la surface agricole utilisée (SAU) en Guyane française de 1980 à 2000...94
19. Evolution de la part des abattis dans le paysage agricole guyanais
entre 1980 et 2000……..94
20. Récapitulatif comparé des caractéristiques des abattis et des fronts pionniers…….96
21. Répartition du foncier en Guyane française……98
22. Importance des occupations sans titre dans les modes d'exploitation
agricole en Guyane française……..98
23. Demandes de baux et concessions enregistrées aux Services Fiscaux
en Guyane……..99
24 Panorama et caractéristiques générales des images utilisées……105
25. Avantages et inconvénients des méthodes et techniques de
détection des changements……..128
26. Matrice de confusion issue de la classification de l'extrait Spot de Charvein…...……144
27. Caractéristiques des types d'occupation du sol à Saint-Georges……..158
28. Répartition des types d'occupation du sol à Saint-Georges……..158
29. Surfaces occupées à St- Georges en 1958……..168.
30. Surfaces occupées en 1987……..168
31. Surfaces occupées en 1998……..168
32. Evolution des superficies des types d'occupation du sol
à Saint-Georges de l'Oyapock entre 1958 et 1998……170
33. Ampleur des dynamiques spatiales à Saint-Georges entre 1958 et 1998……173
34. Surfaces défrichées en Amazonie brésilienne entre 1978 et 1996……..185

LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

1. Les fronts pionniers au Brésil : défrichements définitifs et installation des pâturages….92
2. Sites et situations des abattis……..74
3. Étapes de mise en place des abattis et états de surface correspondants……..77
4. Aperçu des abattis *Djuka* de la région de Charvein……88
5. Aperçu des abattis *Aluku* de la région de Maripasoula……..89
6. Abattis et autres formes d'occupation agricole de la forêt dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock……..91

TABLE DES MATIERES

Avant-propos et remerciements…….2
Sommaire……9
Introduction générale……...10

Chapitre 1. Les forêts tropicales : enjeux et évaluations des superficies……..21
I. Forêts tropicales et préoccupations environnementales contemporaines 21
I.1. Fonctions écologiques et importance économique des forêts tropicales 22
I.2. Forêts tropicales et changements globaux..... 23
II. Evaluations classiques des étendues de forêts et de la déforestation 25
II.1. Les évaluations de la FAO 25
II.2. Les autres évaluations classiques 30
II.3. Aperçu général de l'étendue des forêts et leur évolution récente..... 32
III. Le recours à la télédétection pour améliorer les évaluations 36
III.1. Télédétection et évaluations aux niveaux continental et régional 36
III.2. Télédétection et évaluations au niveau local 41
III.3. Quid du radar dans les régions tropicales ? 42

Chapitre 2. Complexité du phénomène géographique de déforestation en milieu tropical 45
I. Approches d'étude de la *déforestation* en milieu tropical 45
I.1. La *déforestation* : un concept imprécis 46
I. 2. La modélisation de la déforestation en milieu tropical 47
I.2.1. Bases théoriques : entre malthusiens et antimalthusiens 47
I.2.2. Les modèles de déforestation en milieu tropical 49
II. De la forêt « vierge » à la forêt défrichée : une évidence 53
construite ? 53
II.1. La virginité des forêts tropicales : un mythe prégnant 53
II.2. L'émergence du discours sur la déforestation tropicale 56
III. L'amalgame sur l'agriculture itinérante sur brûlis 58
III.1. Une terminologie agricole foisonnante 58
III.2. L'agriculture itinérante traditionnelle : « bouc-émissaire » de la déforestation en milieu tropical…….61
III.3. Une pratique agricole pourtant écologiquement viable ? 63

Chapitre 3. Les défrichements agricoles en forêt amazonienne : état des lieux..... 67
I. Les fronts pionniers au Brésil : un choix politique à l'origine 67
II. Les abattis en Guyane française : un grignotage de la forêt..... 73
II.1. Modalités de mise en place et caractéristiques spatiales des abattis 73
II.1.1. Sites et situations des abattis 73
II.1.2. Etapes de mise en place et états de surface des abattis 75
II.1.3. Tailles et formes des abattis..... 78
II.2. Les communautés humaines de Guyane et la pratique des abattis..... 79
II.2.1. L'installation des communautés humaines sur le territoire 80
II.2.2. Les disparités de peuplement entre les savanes littorales et les forêts intérieures……...82
II.2.3. Les abattis des sites étudiés 86

II.2.3.1. Les abattis *Djuka* de Charvein 86
II.2.3.2. Les abattis *Aluku* de Maripasoula 87
II.2.3.3. Les abattis *Palikur* de Saint-Georges de l'Oyapock 90
II.3. Importance des abattis dans le paysage agricole de la Guyane française 92
III. Problèmes d'aménagement posés par les défrichements agricoles amazoniens 97

Chapitre 4. Méthodes de caractérisation et de suivi des défrichements agricoles par télédétection 102
I. Du choix des capteurs et des niveaux d'analyse 102
I.1. L'apport des enregistrements du visible et de l'infrarouge 104
I.1.1. Les images à faible résolution spatiale 104
I.1.2. Les images à moyenne et haute résolutions spatiales 106
I.1.3. Les images à très haute résolution spectrale 107
I.2. L'apport des images radar 108
I.3. Les photographies aériennes et l'analyse des défrichements agricoles 110
II. Méthodes de caractérisation des défrichements agricoles par télédétection 111
II.2.1. L'approche analogique 111
II.2.2. L'approche numérique 115

III. Méthodes de détection des changements dans l'environnement forestier 116
III.1. Méthodes et techniques de traitements qualitatifs 118
III.1.1. La soustraction d'images 118
III.1.2. La division d'images 119
III.1.3. Les vecteurs de changement 120
III.1.4. Les compositions colorées de canaux bruts 120
III.1.5. Les combinaisons de néo-canaux multidates 121
III.2. Méthodes et techniques de traitements quantitatifs 123
III.2.1. Les classifications synchronisées ou conjointes 125
III.2.2. Les classifications disjointes ou séparées 125

Chapitre 5. Mise en évidence et analyse de l'organisation spatiale des défrichements agricoles en Amazonie 130
I. Détection et identification des défrichements de grande ampleur au niveau régional 132
II. analyse des fronts pionniers et identification des abattis au niveau sous-régional 136
II.1. L'organisation du parcellaire des fronts pionniers 136
II.2. Détection et identification des abattis 139
II.2.1. Typologie des abattis et de l'occupation du sol d'après l'imagerie Spot HRVIR et Landsat TM 140
II.2.2. L'apport du radar pour la mise en évidence des abattis 148
III. Caractérisation détaillée et cartographie des abattis au niveau local 150
III.1. La faible emprise spatiale des abattis 151
III.2. Distribution des abattis par rapport au relief 156
III.3. L'effet structurant du bourg et des routes 157

Chapitre 6. Dynamiques des défrichements agricoles et d'occupation du sol en Guyane française et au Brésil.....162
I. Les dynamiques spatiales au niveau local.....164
I.1. Des mutations spatiales d'une faible ampleur.....164
I.2. Agriculture itinérante, forêt sur place.....171
II. Mise en évidence de l'évolution des défrichements agricoles au niveau sous-régional.....175
II.1. Evolution de l'emprise spatiale des abattis.....175
II.2. Evolution des fronts pionniers.....179
III. Evolution des défrichements agricoles au niveau régional.....182

Chapitre 7. Veille aérospatiale pour le suivi des défrichements agricoles en amazonie.....188
I. Faire face aux contraintes de la surveillance de l'environnement amazonien par télédétection.....189
I.1. Spécificités du cadre géographique et des phénomènes à surveiller.....189
I.2. Apports et limites des systèmes courants d'acquisition d'images.....191
I.3. Se passer de l'obstruction induite par les nuages.....192
I.3.1. Trouver la fenêtre idéale d'acquisition des images.....193
I.3.2. La fusion d'images.....195
I.3.2.1. Fusions d'images Spot 4 *VEGETATION* en vue de remplacer les pixels nuageux.....196
I.3.2.2. Fusions multi-capteurs pour améliorer l'interprétation visuelle des données à l'échelle locale.....199
II. Stratégie de surveillance et de gestion de l'espace par télédétection.....202
III. Indicateurs complémentaires de perception et de suivi de l'environnement..208
III.1. Les indicateurs de pression.....208
III.2. Les indicateurs d'état.....209
III.3. Les indicateurs d'incidence.....210

Conclusion Générale.....212

Références bibliographiques.....220
Sigles et acronymes.....234
Liste des figures.....236
Liste des tableaux.....238
Liste des planches photographiques.....239
Tables des matières.....240

RESUME
La déforestation en milieu tropical est considérée depuis plusieurs décennies comme un fléau écologique majeur. A tort ou à raison, les pratiques de défriche-brûlis sont fréquemment mises en cause. L'objectif de cette thèse est de caractériser et suivre l'évolution des défrichements agricoles en forêt amazonienne par télédétection multi-capteur. Deux types de défrichements sont abordés : les abattis en Guyane française et les fronts pionniers au Brésil. Ces modes de colonisation agricole relèvent de logiques différentes et provoquent une déforestation d'ampleur variable. Les fronts pionniers émanent initialement d'une volonté politique de « mise en valeur » organisée de la forêt, mais ils essaiment par la suite et leur suivi devient difficile. Les abattis, bien que de petite taille, se multiplient très souvent de manière non planifiée. Ces abattis étant en général 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. La méthodologie mise en œuvre pour évaluer et suivre les atteintes à la forêt comporte deux étapes principales. La première consiste à caractériser les configurations télédétectées des abattis et des fronts pionniers sur les images optiques (NOAA AVHRR, Spot 4 VEGETATION, Landsat TM, Spot XS, photographies aériennes) et radar (JERS et ERS). La deuxième porte sur l'utilisation des données multidates pour quantifier l'évolution des défrichements agricoles et expliquer les dynamiques d'occupation du sol. L'exploitation des images est menée alternativement avec l'analyse des données socio-économiques issues d'enquêtes et relevés de terrain. Ces deux étapes débouchent sur une proposition de veille aérospatiale pour la surveillance et la gestion de la forêt amazonienne. Cette veille est déclinée en niveaux de suivi correspondant aux caractéristiques des capteurs et à l'emprise spatiale des défrichements. Pour une surveillance opérationnelle, des traitements d'images adaptés aux spécificités géographiques et climatiques des régions tropicales humides sont proposées, ainsi que des indicateurs environnementaux et socio-économiques qui complètent les observations par satellites.

MOTS-CLES. Déforestation tropicale, défrichements agricoles, abattis, front pionnier, agriculture sur brûlis, occupation du sol, télédétection, SIG, Amazonie, Guyane française, Brésil

ABSTRACT. Tropical deforestation characterization and monitoring using remote sensing : application to agricultural clearings in French Guiana and Brazil

For several decades, tropical deforestation has been considered as a major ecological threat. Wrongly or rightly, shifting slash and burn cultivation is usually blamed. In this thesis, we present a multi-sensor investigation of deforestation due to agricultural clearings and their spatial evolution in Amazonian forest. Two versions of clearings are considered : the French Guiana variant, known locally as *abattis*, and the Brazilian variant, currently described as pioneers fronts. These modes of agricultural colonization are associated with specific land use techniques, and induce deforestation at various scales. Pioneers fronts derive primarily from a political initiative to organize the agricultural use of the forest, but clearings extend rapidly out of control and the monitoring becomes difficult. On the other hand, clearings known as *abattis*, despite their limited extent, multiply very often in an unplanned way. These clearings are generally spontaneous and itinerant, and occur in a context where land statute is precarious and the demand for land increases. Therefore, the need for monitoring becomes critical. The methodology we used to assess and follow-up damages affecting the forest comprises two main stages. The first consists in characterizing clearings patterns on optical images (NOAA AVHRR, Spot 4 VEGETATION, Landsat TM, Spot XS, aerial photographs) and radar data (JERS, ERS). The second step deals with data processing in order to highlight the spatial evolution of clearings and explain land use dynamics. Image analyses are associated with the analysis of socio-economic data resulting from field surveys. These two steps lead to the development of a remote sensing-based strategy for the monitoring and the management of Amazonian forest. This strategy is divided into monitoring levels corresponding to sensors characteristics and clearings extension. For an efficient operational monitoring, we pointed out image processing methods adapted to geographical and climatic context of the wet tropical areas. We also suggested socio-economic and environmental indicators which can supplement observation with images provided by satellites.

KEYWORDS. Tropical deforestation, forest clearings, shifting slash and burn cultivation, pioneers fronts, land use, remote sensing, GIS, Amazonia, French Guiana, Brazil

Laboratoire Régional de Télédétection
Centre IRD de Cayenne
B.P. 165-97323 Cayenne Cédex

Pôle Géomatique
Centre IRD d'Orléans
5, rue du Carbone, 45072 Orléans Cédex 2