

Laurent POLIDORI, Jean-Marie FOTSING, Jean-François ORRU

Déforestation et orpaillage : apport de la télédétection pour la surveillance de l'occupation du sol en Guyane française

INTRODUCTION

On observe en Guyane française, comme dans le reste de l'Amazonie, une confrontation d'intérêts entre les populations forestières qui tirent la majeure partie de leurs ressources alimentaires du milieu naturel, les acteurs de l'activité aurifère (sociétés et orpailleurs) qui exploitent les richesses minérales et enfin l'État, qui tantôt stimule le développement de l'emprise humaine sur le milieu, avec notamment le développement de fronts pionniers et d'infrastructures pour organiser et maîtriser les espaces vides (comme au Brésil ; voir annexe 14), tantôt s'investit dans la mise en œuvre de politiques environnementales et indigénistes et cherche à concilier le développement durable et les modes de vie des populations locales. C'est lorsque ces intérêts s'opposent dans une même zone géographique qu'il y a conflit (ORRU, 1998). C'est pourquoi la gestion des problèmes d'intoxication par le mercure exige d'abord une connaissance actualisée de l'occupation du sol sur l'ensemble du territoire considéré.

Cette contribution sur l'apport de la télédétection à l'étude de l'environnement amazonien se limitera essentiellement à la Guyane française et au nord du Brésil. Après avoir rappelé les difficultés liées au passage de l'Amazonie à la Guyane par une comparaison des deux espaces en termes physiographiques et démographiques, nous décrirons dans leurs grandes lignes les comportements spatiaux des principaux facteurs de risque en Guyane, en distinguant d'une part la déforestation, les phénomènes d'inondation et les lacs de retenue, les activités d'orpaillage en tant que phénomènes propices à la production de méthylmercure, d'autre part la présence, sur place et en aval, de populations humaines menacées par une éventuelle contamination au méthylmercure.

formé de petites collines présentant des versants localement pentus malgré de faibles dénivelées et des bassins hydrographiques très denses et de superficie réduite. Cette topographie monotone dite en « peau d'orange » est interrompue au sud par quelques massifs isolés qui culminent autour de 400-600 m d'altitude. Les mécanismes de transfert du méthylmercure, probablement très sensibles à la topographie et à la morphologie des bassins versants, ont donc toutes les chances d'être quantitativement très différents.

CARACTÉRISTIQUES DÉMOGRAPHIQUES

Au premier abord, l'Amazonie est vide d'habitants, avec des densités de population inférieures à un habitant au kilomètre carré. Cette caractéristique vaut pour tous les pays du bassin amazonien. Si la Guyane française peut sembler encore plus vide que ses voisins, c'est que ces derniers possèdent de grands centres urbains qui sont généralement extérieurs au bassin amazonien (zone andine pour la Colombie, l'Équateur et le Pérou, côte orientale et grandes métropoles du sud pour le Brésil) mais qui entraînent une densité moyenne sensiblement plus élevée à l'échelle nationale (tabl. I). Par conséquent, malgré la disparité des chiffres, on peut affirmer que le vide démographique est une caractéristique générique de toute l'Amazonie.

Tableau I. Densité de population dans les pays du bassin amazonien.

Pays	Densité de population (hab./km ²)
Bolivie	7,3
Brésil	19,6
Colombie	39,3
Équateur	44,0
Guyana	4,3
Guyane française*	1,9
Pérou	19,4
Surinam	2,7
Venezuela	26,3

* D'après le recensement INSEE de 1999.

Source : *État du Monde*, 2000.

Pourtant, malgré cette similitude en termes de concentration moyenne, la Guyane diffère de l'Amazonie brésilienne par la répartition spatiale des implantations humaines.

type de capteur (sensibilité à des caractéristiques très variées du paysage), permet désormais de s'adapter à des situations géographiques et opérationnelles très spécifiques, pourvu que celles-ci soient correctement caractérisées.

COMPORTEMENT SPATIAL DES FACTEURS DE RISQUE

LA DÉFORESTATION

Montrée du doigt depuis de nombreuses années comme l'un des grands fléaux écologiques de la fin du xx^e siècle, la déforestation est aussi un symptôme des problèmes sociaux et géopolitiques qui caractérisent les derniers espaces couverts par la forêt tropicale. Cette réalité concerne aussi bien la Guyane que le reste de l'Amazonie, même si l'ampleur du phénomène reste relativement limitée en Guyane.

En effet, contrairement aux grands fronts pionniers brésiliens qui sont guidés par une volonté planificatrice du gouvernement fédéral (voir annexe 14), le phénomène de déforestation apparaît en Guyane plus spontané et plus désordonné, limité surtout par les moyens techniques de défrichement, par la faiblesse des effectifs concernés et par l'absence de grands propriétaires terriens (TSAYEM, 1999).

Ainsi, hormis une quinzaine d'entreprises forestières qui se maintiennent tant bien que mal face à la concurrence du bois brésilien et exploitent, à grand renfort de subventions, des concessions situées sur la bordure littorale et sur la route de l'est, l'essentiel de la déforestation en Guyane relève plutôt de l'exploitation individuelle et de la tradition d'agriculture itinérante sur brûlis qu'on constate le long des deux fleuves frontaliers à l'ouest (Maroni) et, dans une moindre mesure, à l'est (Oyapock).

Dans ces zones, à l'exception de quelques bassins agricoles comme Javouhey, Charvein (fig. 1) ou Cacao, les abattis sont souvent de petite taille (de l'ordre de l'hectare), le long des voies de circulation (routes, pistes ou cours d'eau), sur des terrains quelquefois très pentus. Ces abattis n'ont parfois pas de connexion directe avec le réseau hydrographique mais l'inclinaison des pentes et la violence des précipitations favorisent le ravinement, par la mise à nu des sols latéritiques (photo 1).

Une cartographie des pentes à l'échelle de la parcelle permettrait, couplée à l'identification de l'occupation du sol, d'évaluer les risques d'érosion liés à cette activité. Des techniques comme la photogrammétrie numérique ou l'altimétrie laser aéroportée, qui donnent une précision de l'ordre du degré, méritent d'être testées avec cette finalité mais elles sont peu rentables à l'échelle de toute la Guyane. Une approche complémentaire consiste à établir une typologie des paysages à partir d'images satellitaires, notamment radar, en vue d'une caractérisation des bassins versants ou sous-bassins versants en termes d'érosion. Cette approche doit se contenter d'indicateurs très indirects liés par exemple à la texture du microrelief et de la canopée, ou encore à la morphologie du réseau hydrographique (caractéristiques qu'on peut obtenir à partir d'images radar satellitaires). Ainsi, le risque est probablement accru en Guyane par la morphologie dite en « peau d'orange », même si la nature même des abattis, ponctuels et itinérants, avec maintien en place des souches d'arbres, limite malgré tout le ruissellement, le ravinement et l'érosion des sols (photo 2). Toutefois, cela ne permet pas, en l'état actuel des pratiques culturales, d'envisager une pérennisation des parcelles exploitées sans apport d'engrais, et les abattis sont généralement abandonnés à la revégétalisation naturelle au bout de deux à trois ans.

Les pistes qui desservent les zones déboisées sont reconnaissables à la couleur caractéristique de la latérite, sauf si elles sont recouvertes par la canopée. Même si l'ouverture d'une piste contribue à l'érosion et indirectement à la production de méthylmercure, c'est surtout en tant qu'indicateur d'une activité à risque qu'il est important de pouvoir la détecter et la localiser. En effet, la piste ou la route permettent le passage de véhicules et donc de moyens d'exploitation plus importants.

En Amapá, État brésilien frontalier qui présente de grandes similitudes avec la Guyane (de la géomorphologie à la démographie), le phénomène de déforestation est d'une ampleur à peine supérieure à ce qu'on peut voir du côté guyanais. La colonisation de la forêt se fait préférentiellement le long des cours d'eau et des pistes, et les abattis ont des tailles de quelques hectares (fig. 2). Par conséquent, les mesures de surveillance préconisées ci-après s'appliquent aussi bien à la Guyane qu'à l'Amapá, et les moyens d'acquisition et de traitement de l'information gagneraient à être mis en commun.

Plus au sud, les grands fronts pionniers qui traversent la forêt amazonienne suivent des axes tracés artificiellement il y a moins d'un demi-siècle.

Ces fronts sont constitués par des parcelles d'une centaine d'hectares alignées le long de structures en forme de râteau. Ils peuvent atteindre 100 km de largeur, ce qui rend leur observation par satellite particulièrement aisée, même avec une résolution très grossière (fig. 3).

INONDATIONS ET RETENUES

Si on excepte les marais de la plaine côtière, la seule étendue d'eau notable en Guyane est le lac de retenue du barrage hydroélectrique de Petit-Saut, sur la rivière Sinnamary. Sa superficie, de l'ordre de 360 km², est très inférieure à celle des grandes retenues du Surinam ou du Brésil. Contrairement aux lagunes des plaines côtières, la retenue de Petit-Saut a une forme très découpée, et aucun point n'est situé à plus d'un kilomètre de la terre ferme (fig. 4 a).

La retenue est constituée en grande partie de forêt inondée, comme le montre l'image radar acquise par JERS après la mise en eau (fig. 4 b). Cette image permet de distinguer l'eau à l'air libre (en noir), la forêt inondée (en blanc) et la forêt exondée (en gris moyen). Bien que les variations de hauteur des arbres morts au-dessus de la surface suggèrent des variations d'altitude du sol avant la mise en eau, la profondeur, et donc le volume, ne peuvent être connus avec exactitude en raison de la précision altimétrique extrêmement médiocre des cartes topographiques dans les secteurs boisés.

Contrairement aux inondations naturelles qui, malgré de légères fluctuations annuelles, occupent les mêmes régions de manière chronique, la retenue couvre des zones antérieurement exondées dans lesquelles d'anciennes activités d'orpaillage ont pu apporter du mercure métallique. C'est le cas de la retenue de Petit-Saut, qui recouvre d'anciens placers de la rive gauche du Sinnamary. Le mercure stocké depuis plus d'un siècle se retrouve donc dans des conditions favorables à la méthylation à la suite de la mise en eau du barrage.

Le rôle des inondations, naturelles ou artificielles, comme facteurs de risque est favorisé par le relief de l'Amazonie et des Guyanes, constitué de vastes plaines et de petites collines et donc caractérisé par de faibles dénivellations. En effet, pour une cote altimétrique donnée, la faible profondeur se traduit par une étendue horizontale d'autant plus grande. Autrement dit, seules de très vastes retenues peuvent, en termes d'énergie hydroélectrique, présenter un intérêt productif dans un paysage de type amazonien. Cela

accroît inévitablement le risque que présente une telle infrastructure en termes de production de méthylmercure.

LES ACTIVITÉS D'ORPAILLAGE

En Guyane, les espaces minéralisés sont globalement répartis selon deux bandes ouest-est (fig. 5) : l'une, entre le Maroni et l'Approuague, qui part de la crique Beiman et couvre les placers de la moyenne Mana, du moyen Sinnamary, de la Comté et du moyen Approuague, ainsi que la montagne de Kaw ; l'autre qui suit globalement la chaîne Inini-Camopi, depuis Maripasoula jusqu'à Camopi, en englobant la région de Saül ainsi que le bassin de la rivière Waki.

Depuis les premières découvertes, l'activité aurifère a fait l'objet de nombreuses études, d'abord sur les aspects géologiques et techniques de l'exploitation du minerai mais aussi sur les phénomènes sociaux qui l'ont accompagnée. Faut-il préciser que l'or fut pour la Guyane le moteur d'une forte poussée exploratoire et de l'implantation de milliers de personnes à l'intérieur de la Guyane (voir annexe 12) ?

De cette période où le peuplement de l'intérieur pesait considérablement sur l'effectif total de la population de la Guyane, il ne reste aujourd'hui que quelques noms de lieux-dits, de placers ou de villages totalement abandonnés, mais dont la toponymie (indiquée sur la carte IGN au 1/500 000 et dont la figure 6 présente un extrait) est à rattacher directement au premier cycle aurifère.

Les études récentes portant sur le cycle biogéochimique du mercure ont mis en évidence, en Guyane, le rôle aggravant de l'activité aurifère, et plus particulièrement de l'orpaillage : d'une part par des rejets supplémentaires de mercure métallique ; d'autre part par une érosion certaine des sols qui favorise la mobilisation et le transport du mercure métallique jusqu'aux points les plus bas (barranques, bas-fonds, cours d'eau...).

Ces impacts sont autant de facteurs favorisant la méthylation et le passage dans la chaîne trophique.

S'il reste impossible de distinguer, dans la contamination au méthylmercure, la part provenant de l'activité aurifère de celle issue du mercure dit

naturel, on peut toutefois établir une distinction, quant aux impacts, entre l'orpaillage ancien et l'orpaillage récent.

L'orpaillage ancien mérite d'être considéré parmi les facteurs de risque en raison de l'importance des quantités de mercure élémentaire rejetées dans les cours d'eau ou qui se sont rassemblées en poche sur les terrains exploités. Dans ce dernier cas, le mercure, tant qu'il n'est pas remanié, reste inerte, à l'état métallique, et donc sans danger pour la santé humaine.

L'inventaire de ces sites est une tâche laborieuse mais réalisable. Il passe tout d'abord par une recherche historique systématique, à travers les archives des services miniers, les récits et les rapports des voyageurs et des fonctionnaires (HURAUULT, 1960) qui ont parcouru l'intérieur du territoire et par la mémoire collective conservée par quelques anciens qui ont vécu la fin de cette période (STROEBEL, 1998). L'analyse de ce matériau historique permet de reconstituer une information géographique, et parfois qualitative, des espaces exploités et habités par les mineurs. La figure 7 présente les principaux placers exploités durant le premier cycle aurifère.

Par ailleurs, le premier cycle aurifère a laissé quelques traces visibles dans le paysage à différentes échelles. Sur les grand placers comme Boulanger ou Paul Isnard, l'importance de l'exploitation et sa relative continuité dans le temps offrent à la télédétection une approche spatio-temporelle des sites exploités. Toutefois, pour la majeure partie des placers, l'aspect artisanal qui a caractérisé l'orpaillage du premier cycle aurifère n'a laissé que peu de stigmates repérables par les outils de la télédétection. À partir de photographies aériennes ou de séquences vidéographiques aériennes, certains indices permettent cependant de localiser tantôt des espaces habités, par la présence de clairières et d'arbres fruitiers, tantôt des espaces potentiellement exploités, identifiés par les cambrouzes¹.

Cependant, dans ces deux cas, l'approche spatiale ne fournit que des indices, qu'il est essentiel de corroborer ou d'infirmer par des reconnaissances de terrain.

¹ Lors des missions menées dans le secteur de Dorlin, il a été identifié un phénomène de recolonisation des sites miniers abandonnés par des formations végétales nommées cambrouzes, dont la texture se détache très nettement du couvert forestier initial. Cependant, il convient de rester prudent vis-à-vis de l'origine des cambrouzes, qui dans d'autres cas peuvent s'expliquer par des phénomènes naturels.

Au sol, les traces de la présence des mineurs du début du XX^e siècle sont encore visibles. Tout d'abord, les dégradés et des aménagements forestiers divers, puis les cimetières, dont les tombes sont identifiées par des rangées de bouteilles plantées tête en bas. Tandis que les ruines des villages disparaissent progressivement sous la végétation, les chantiers des orpailleurs ont modelé le sous-bois des flats. Les monticules de graviers et les fosses plus ou moins importantes, ainsi que les fronts de taille et les restes des canaux d'alimentation en eau, permettent de localiser les espaces exploités par les orpailleurs.

Signalons que bon nombre de ces indices historiques ont déjà disparu car, depuis le début des années 1980, la plupart des placers exploités lors du premier cycle font l'objet d'une nouvelle exploitation (fig. 8). La modernisation des outils et des techniques d'exploitation, permettant de travailler sur de plus grandes surfaces, a favorisé la remise en activité des anciens placers. Les « poches de mercure » stabilisées après l'abandon progressif de l'activité aurifère au sortir de la Seconde Guerre mondiale sont remobilisées par des exploitations mécanisées de grande envergure. Les petites fosses que creusaient autrefois les orpailleurs ont cédé la place à une exploitation qui recouvre, dans la plupart des cas, la surface du flat (photos 3 et 4), ce qui la rend plus facilement identifiable par télédétection. De nouveaux rejets de mercure viennent donc s'ajouter au stock ancien, multipliant ainsi les rejets (voir annexe 12). Le risque aujourd'hui comprend donc l'héritage du premier cycle qui est particulièrement exacerbé sur les placers en activité.

Aujourd'hui, les zones orpaillées se caractérisent par une disparition totale de la végétation, sur une largeur de quelques décimètres à quelques hectomètres, couvrant souvent une grande partie du flat des petits cours d'eau. En aval de ces zones, l'eau présente une turbidité anormalement élevée, ce qui fournit un critère de reconnaissance particulièrement commode. En effet, une eau chargée de sédiments constitue l'un des objets les plus réfléchissants du paysage, contrastant particulièrement avec la forêt qui est au contraire l'un des plus sombres. La disponibilité d'un canal infrarouge permet de rendre ce contraste encore plus net et ainsi de localiser les criques dont la turbidité est supérieure à la normale.

Une résolution décimétrique permet de localiser des criques orpaillées par satellite de manière très fiable (fig. 9), même si une description détaillée de l'activité nécessite au moins une résolution métrique (fig. 10 et 11). L'accès à une imagerie géoréférencée à résolution métrique (notamment les photogra-

L'aspect urbain de ces foyers de peuplement s'accompagne d'une certaine variation des habitudes alimentaires, et les risques sanitaires liés à une absorption régulière d'aliments contaminés sont bien moindres, si on les compare avec les foyers de peuplement wayana du haut Maroni. Par ailleurs, d'un point de vue strictement technique et logistique, les mesures préventives sont *a priori* plus faciles à mettre en place dans les communes du littoral que dans celles de l'intérieur.

En dehors de ces implantations humaines permanentes, la population bien que moins nombreuse est principalement établie le long des deux fleuves frontaliers. Dans ces communes qui n'ont qu'une trentaine d'années d'existence, l'emprise spatiale évolue très rapidement, surtout depuis la guerre civile du Surinam qui a provoqué le déplacement puis l'installation définitive de réfugiés sur la rive droite du Maroni, de Saint-Laurent jusqu'à Maripasoula.

Dans ces foyers de peuplement, où le foncier reste une question abstraite, la télédétection prend tout son sens en permettant une mise à jour régulière de l'emprise humaine. Cependant, l'information géographique fournie doit être associée à des données socio-économiques et socioculturelles, notamment sur les pratiques alimentaires (FLEURY, 1998). Par ailleurs, il est aisé de mettre en évidence la présence de tout petits groupes humains. En effet, la photographie aérienne acquise à basse altitude autorise la description fine de chaque zone exploitée (abattis, crique orpaillée...) et des traces d'activités associées (carbet, voies d'accès, véhicules, engins...). Toutefois, une telle approche ne peut intervenir que de manière très localisée, et une généralisation à toute la Guyane ne peut être envisagée que selon une démarche multi-échelle, comme nous le suggérons ci-après.

SUIVI PAR TÉLÉDÉTECTION : MÉTHODES ET RECOMMANDATIONS

APPORT ET LIMITES DE LA TÉLÉDÉTECTION : GÉNÉRALITÉS

Les facteurs de production du méthylmercure peuvent tous être appréhendés par télédétection, qu'il s'agisse de localiser les activités à risque (déboisement, inondation ou orpaillage) ou d'en décrire l'évolution dans l'espace et

dans le temps. En effet, dès lors que ces activités se font à ciel ouvert, elles sont visibles depuis le ciel ou l'espace, pourvu qu'elles aient été observées avec le capteur approprié. Cependant, si les images satellitaires permettent de détecter, localiser et décrire des abattis ou des barranques, elles n'apportent aucune information directe sur l'abondance du mercure dans un écosystème, et les mesures *in situ* restent incontournables.

Compte tenu de la complexité du phénomène de colonisation de la forêt guyanaise, de la diversité des emprises spatiales et du caractère imprévisible de la localisation des zones touchées, aucun système ne permet de répondre seul aux exigences d'une telle surveillance. Une analyse fondée sur la complémentarité de différents principes d'observation est donc recommandée. Plusieurs méthodes de fusion², toutes utiles mais présentant des contraintes techniques différentes (POLIDORI et MANGOLINI 1996), sont envisageables : fusion entre différentes résolutions spatiales (dite multi-échelle), entre différentes dates d'acquisition (dite multodate), ou encore entre différents types de capteurs (notamment optique et radar).

LA DIMENSION SPATIALE

La fusion de données de résolutions différentes peut s'avérer très rentable d'un point de vue opérationnel, car chaque échelle permet de déterminer le lieu et l'époque où l'échelle suivante doit être actionnée. Nous distinguerons, pour simplifier, trois gammes d'échelle.

Une petite échelle (compatible avec une cartographie de l'ordre du 1/1 000 000), qui correspond à des données à basse résolution, fournies par des systèmes qui couvrent quotidiennement la Terre avec des fauchées de plus de 2 000 km, mais avec une résolution de l'ordre du kilomètre. *A fortiori*, toute la Guyane est largement contenue dans une seule image. Si ce type d'imagerie permet un suivi exhaustif des fronts pionniers brésiliens en raison de leur grande étendue spatiale (MALINGREAU *et al.*, 1989), son application à la Guyane est beaucoup plus limitée, fournissant au mieux un indicateur spatial de dégradation de la forêt sur des unités de paysage de plusieurs kilomètres

² On parle généralement de « fusion » pour désigner la combinaison de données d'origine ou de nature diverses.

carrés. Les capteurs AVHRR³ et Végétation, embarqués respectivement sur les satellites NOAA et SPOT-4, font partie de cette catégorie, de même que les capteurs radar de type ScansAR (embarqués actuellement sur Radarsat, et prochainement sur la plate-forme Envisat de l'Agence spatiale européenne).

Une moyenne échelle (compatible avec une cartographie de l'ordre du 1/100 000), qui correspond à des données de résolution décimétrique. Le capteur TM (*Thematic Mapper*) embarqué sur Landsat offre une résolution au sol de 15 ou 30 m, et le capteur HRVIR embarqué sur SPOT-4 une résolution de 10 ou 20 m selon le mode d'acquisition. La périodicité des passages est de 16 jours pour Landsat et 26 jours pour SPOT, mais ces valeurs sont purement théoriques et exclusivement liées aux contraintes orbitales, la couverture nuageuse ne permettant pas d'avoir une telle cadence pour l'acquisition des images. À cette échelle, il faut plusieurs images, voire plusieurs dizaines, pour couvrir l'ensemble du territoire guyanais, ce qui oblige à effectuer des raccordements dans les zones de contact. Ce traitement, incontournable si les images doivent alimenter une base de données cartographiques, est complexe et nécessite à la fois un outillage informatique adapté et l'intervention d'un opérateur qualifié. Il peut être particulièrement délicat en cas de fort diachronisme, c'est-à-dire lorsque les images ont été acquises à des dates très différentes.

Enfin, une grande échelle (compatible avec une cartographie de l'ordre du 1/25 000, voire du 1/10 000), couverte par des données acquises lors de survols aériens, avec des résolutions variant entre 10 cm et 1 m selon l'altitude de vol et la focale de l'instrument. La photographie aérienne, utilisée pour la cartographie officielle de la plupart des pays du monde, fait l'objet de ce fait d'une mise à jour régulière mais avec une périodicité relativement longue et limitée aux régions cartographiées à grande échelle. Ainsi, pour la Guyane française, les dernières missions remontent à 1987 et 1992, et elles sont limitées à une bande côtière de 20 km de largeur. Cette cadence et cette extension spatiale ne sont pas compatibles avec les exigences d'une surveillance opérationnelle de l'occupation du sol, mais des missions supplémentaires, au-delà des prérogatives de service public de l'Institut géographique national, peuvent être envisagées par le biais de prestataires privés.

3 Les images AVHRR sont acquises quotidiennement, en réception directe, au Laboratoire régional de télédétection (IRI, Cayenne).

Une chambre de prise de vue utilisée pour la photographie aérienne est soumise à un étalonnage géométrique extrêmement précis, conformément aux exigences de la cartographie officielle à grande échelle. Un tel équipement est de ce fait très long à amortir financièrement, donc peu répandu et de mise en œuvre plutôt onéreuse. Il est en conséquence préférable d'en limiter l'usage à des régions connexes et étendues (généralement plus de 100 km² contigus) où les problèmes sont notoires. En d'autres termes, il faut éviter de recourir à cette technologie pour un résultat incertain.

Au contraire, pour une observation de type exploratoire sur des zones mal connues où des images satellitaires ont révélé la présence probable d'abattis ou de sites orpillés, on aura intérêt à recourir à des techniques plus rudimentaires donc moins coûteuses. Ainsi, l'utilisation d'un camescope ou d'un appareil photographique numérique dont l'optique est orientée de manière grossière, fixé à l'extérieur d'un avion localisé par GPS, permet d'obtenir dans un délai de quelques heures de véritables pièces à conviction, même si leur qualité cartographique reste très limitée. Les figures 10 et 11 montrent des images obtenues au moyen d'un camescope numérique au cours de vols à basse altitude au-dessus d'exploitations aurifères. Ce mode d'observation fournit des images en couleurs naturelles – donc propices à une interprétation visuelle très intuitive – avec généralement une résolution au sol de quelques décimètres. Si ce mode d'acquisition peut être séduisant par son faible coût et sa souplesse d'emploi, il est en revanche limité par des contraintes technologiques. D'une part, l'étroitesse du champ de vue (moins de 1 000 pixels, contre plus de 5 000 pour une photographie aérienne soigneusement numérisée) conduit à faire un choix difficile entre une haute résolution spatiale (exigeant un vol à basse altitude) et une scène suffisamment large (exigeant un vol à plus haute altitude), la seule manière d'échapper à ce choix difficile étant d'effectuer plusieurs vols parallèles à basse altitude, ce qui oblige à créer une mosaïque. D'autre part, la faible qualité géométrique de ce système introduit d'importantes déformations dans les mosaïques et parfois des « trous » entre bandes adjacentes.

L'analyse multi-échelle consiste à mettre à profit la complémentarité des différentes échelles d'observation. Ainsi, les images à résolution kilométrique permettent d'assurer une surveillance de type veille, et leur faible coût autorise des acquisitions aussi fréquentes que le permettent la couverture nuageuse (très importante en Guyane) et les capacités de traitement. Le passage

à une résolution décimétrique se heurtant à des contraintes de coût et de délai de traitement, sa mise en œuvre sur tout le territoire guyanais ne peut raisonnablement être envisagée qu'avec une périodicité d'un à deux ans au minimum. En revanche, cette périodicité peut être beaucoup plus courte sur des zones d'intérêt prioritaire, qu'elles soient décelées à partir des images à basse résolution ou identifiées par ailleurs. Enfin, les données à haute résolution, telles que les photographies aériennes, ne présentent un intérêt opérationnel que pour des zones restreintes et bien identifiées géographiquement.

LA DIMENSION TEMPORELLE

La dimension temporelle n'est pas indépendante de la dimension spatiale, et les résolutions correspondantes sont en relation inverse l'une de l'autre. En effet, plus la résolution spatiale est grossière, plus la cadence de mise à jour de l'information peut être élevée. Des images satellitaires à moyenne résolution sont adaptées à une cartographie annuelle de l'évolution de l'occupation de l'espace dans toutes les zones susceptibles de présenter un intérêt, tandis que la photographie aérienne se prête plutôt à une périodicité de 5 à 10 ans, sauf pour des zones très spécifiques où les acquisitions se feront plutôt à la demande.

Les possibilités de cartographie dynamique doivent être replacées dans un contexte historique. En effet, des images anciennes, acquises avec d'autres finalités, existent et méritent d'être utilisées comme témoins d'un état passé pouvant être considéré comme un « état initial » sur des secteurs où des modifications ultérieures sont intervenues. Des images satellitaires ont été acquises depuis les années 1970. Quant aux photographies aériennes, elles existent depuis le début du ^{xx}e siècle et sont abondamment utilisées depuis la Seconde Guerre mondiale. En Guyane, des photographies aériennes couvrant la quasi-totalité du territoire depuis les années 1950 (les plus anciennes sont des vues du littoral datant de 1946) sont conservées dans la photothèque de l'IRD, à Cayenne.

AVANTAGE DES SYSTÈMES RADAR POUR LA GUYANE

Le climat de la Guyane est également une contrainte à prendre en compte, car la couverture nuageuse rend très difficile l'acquisition systématique

d'images optiques. La saison favorable est limitée à quelques mois (août à novembre) et, même en cette saison, il n'est pas rare de voir le taux de couverture nuageuse atteindre 10 à 20 % de la superficie observée. C'est pourquoi la programmation des images est délicate (examen détaillé des *quick-looks*, réglage des paramètres de prise de vue). Des observations peuvent également être requises en période pluvieuse, soit face à un besoin urgent d'information, soit pour la cartographie de zones d'inondation. Hormis la possibilité de faire voler un avion ou un hélicoptère sous les nuages (ce qui donnerait des images d'une piètre qualité et pourrait s'avérer dangereux en termes de navigation aérienne), l'imagerie radar est l'unique solution envisageable par temps nuageux ou pluvieux. En effet, la diffusion des micro-ondes par l'atmosphère est totalement négligeable au-delà d'une longueur d'onde de quelques centimètres, même par forte pluie.

L'insensibilité des ondes radar à l'atmosphère (ce qui est particulièrement appréciable en région amazonienne), alliée à la possibilité d'effectuer des acquisitions de jour comme de nuit, fait du radar un capteur dit « tout temps », dont les acquisitions peuvent être planifiées de manière très fiable (RUDANT, 1994 ; POLIDORI, 1997).

Le radar présente un autre avantage opérationnel extrêmement précieux pour la cartographie de l'occupation du sol. En effet, il est caractérisé par une grande précision de localisation absolue, la construction de l'image étant insensible aux instabilités du satellite ou de l'avion (précision de l'ordre du décimètre, contre plusieurs hectomètres dans le cas des capteurs satellitaires optiques). On peut de ce fait se passer de points d'amer, autre avantage appréciable en forêt amazonienne où les repères planimétriques sont particulièrement rares.

COMPLÉMENTARITÉ DES CAPTEURS EXISTANTS

Parallèlement à ces avantages opérationnels, les images radar sont sensibles à des caractéristiques des paysages auxquelles les images photographiques ou, plus généralement, optiques ne donnent pas accès. Pour peu que certaines précautions soient prises dans la manipulation des données (choix d'une échelle commune, recalage géométrique), cette complémentarité est de nature à fournir des renseignements très précieux sur l'occupation du sol.

Les capteurs optiques captent la fraction de rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre, soit en intégrant toutes les longueurs d'onde (imagerie noir et blanc ou panchromatique), soit dans des longueurs d'onde séparées (imagerie couleurs ou multispectrale). Ces capteurs présentent l'avantage de se prêter à une interprétation très intuitive, essentiellement du fait de leur similitude avec l'œil humain quant à la construction de l'image (géométrie, physique de la mesure). Cette convivialité est particulièrement évidente dans la partie visible du spectre électromagnétique, ce qui permet à des acteurs non qualifiés de participer à une lecture collective de photographies aériennes. Au-delà de la simple source d'information, on comprend donc que cette donnée puisse être sollicitée comme support de communication ou pièce à conviction dans des négociations impliquant tous les acteurs concernés, et pas uniquement des techniciens du domaine.

Parmi les capteurs optiques, ceux qui proposent un canal dans le proche infrarouge (longueur d'onde de l'ordre du micron) sont d'un usage très répandu et sont particulièrement adaptés à des paysages de type amazonien comme la Guyane : d'une part, parce que ces longueurs d'onde sont peu perturbées par l'atmosphère (la couverture nuageuse reste un écran impénétrable, mais une légère brume est sans effet sur les images) ; d'autre part, et surtout, en raison de leur grande sensibilité à la végétation. La comparaison entre le rouge (rayonnement utilisé pour la synthèse de la chlorophylle et donc totalement absorbé par la forêt) et l'infrarouge (presque totalement réfléchi par la végétation) permet non seulement une distinction très nette entre les secteurs boisés et non boisés, mais aussi une classification fine entre les différents couverts végétaux. En effet, les mesures sont variables selon le type de peuplement forestier ou, dans le cas de parcelles mises en culture, selon la nature de la culture et le stade de croissance. Cette capacité de discrimination est accrue lorsque des mesures dans le moyen infrarouge (autour de 1,5 micron) sont également disponibles⁴. Le traitement de données optiques dans des longueurs convenablement sélectionnées renseigne donc sur l'activité agricole et, plus généralement, sur toute activité portant atteinte à la forêt. En particulier, les pistes forestières sont reconnaissables à la couleur caractéristique de la latérite.

1 4 C'est le cas des données du capteur HRVIR de SPOT-4 (fig. 1).

Les variations spatiales de la couleur de l'eau, telles qu'elles sont fournies par un capteur optique de type multispectral, renseignent sur les différents niveaux de turbidité (fig. 12). Idéalement, un capteur hyperspectral⁵ bien étalonné permet d'estimer la composition de l'eau et la concentration des principaux constituants. Cependant, conclure qu'il s'agit de turbidité naturelle ou du brassage des sédiments le long d'un affluent orpillé nécessite une connaissance *a priori* des impacts de cette activité et, si la reconnaissance de sédiments riches en mercure peut être envisagée à partir des propriétés optiques et thermiques (FENSTERMAKER et MILLER, 1994), cela relève encore de la recherche, faute d'une réelle validation.

Au-delà de 3 microns et jusqu'à environ 15 microns, les images optiques renseignent sur le rayonnement émis par la surface, et non plus sur la lumière solaire qu'elle a réfléchi. Les capteurs qui fonctionnent dans ce domaine sont dits thermiques car le rayonnement émis est fortement influencé par la température de la surface. Ils sont beaucoup plus utilisés en mer (aide à la pêche, météorologie marine, détection de polluants) que sur les continents, et l'usage de données thermiques sur la Guyane reste marginal. Mentionnons toutefois la possibilité de mettre en évidence et localiser des activités humaines, essentiellement du fait de la sensibilité des capteurs thermiques aux incendies et feux de brousse, surtout la nuit en raison du refroidissement du sol, ce qui augmente le contraste.

Quant aux capteurs radar, ils fonctionnent dans le domaine des micro-ondes (longueurs d'onde comprises entre 1 cm et 1 m approximativement), ce qui les rend à peu près insensibles à l'atmosphère, même en cas de pluie. L'intensité des échos radar, qui sert de base à la construction de l'image, dépend essentiellement de l'humidité et de la rugosité de la surface, mais ces deux caractéristiques combinent leurs influences d'une manière extrêmement complexe, et le résultat dépend en grande partie de la longueur d'onde. Les systèmes radar à grande longueur d'onde (comme JERS⁶, dont sont issues les

⁵ Un capteur optique est dit multispectral lorsqu'il effectue des mesures indépendantes dans plusieurs longueurs d'onde, et hyperspectral dans plusieurs dizaines, voire centaines, de longueurs d'onde.

⁶ Le capteur radar de JERS fonctionne en bande L, ce qui correspond à une longueur d'onde d'environ 25 cm.

images 3 b et 4 b) sont particulièrement intéressants en région amazonienne en raison de leur capacité à traverser toutes les strates de la canopée en subissant très peu de dispersion, ce qui leur permet d'être sensibles à la constitution du sous-bois. En particulier, la présence d'eau conduit à une double réflexion de l'onde radar sur le plan d'eau horizontal et les troncs verticaux, et donc à un écho très intense. Ainsi, une image JERS (fig. 4 b) permet de discriminer la forêt inondée (en blanc) et la forêt exondée (en gris). En revanche, la profondeur de l'eau n'a aucun impact sur cet écho.

Signalons que les capteurs radar, qui émettent une onde en éclairage oblique, sont très sensibles au relief, ce qui permet une analyse très détaillée de l'hydrographie même à travers un tapis de forêt dense. En cas de relief très prononcé, cette sensibilité peut se transformer en un inconvénient majeur (saturation du signal, ombres portées), mais une telle situation est très rare en Guyane.

Enfin, un traitement interférométrique, fondé sur l'exploitation du déphasage entre deux échos radar peu espacés dans le temps (généralement une journée) et dans l'espace (écartement de l'ordre de 100 m entre les deux orbites), permet d'élaborer un produit dit de cohérence qui fournit des renseignements précieux sur l'occupation du sol (WEGMULLER et WERNER, 1995), même si les critères d'interprétation sont difficiles à étalonner. La cohérence interférométrique, directement calculée à partir des signaux radar sans apport de données externes, est indicatrice de la stabilité de la phase du signal à l'échelle de la longueur d'onde (ZEBKER et VILLASENOR, 1992). Les longueurs d'onde les plus utilisées étant de l'ordre de 6 cm (bande C), tout mouvement aléatoire dont l'amplitude avoisine le centimètre (cela peut être le cas à la surface de l'eau ou au sommet de la canopée) est susceptible de faire chuter la cohérence, tandis qu'une zone urbanisée et un abattis avec maintien des souches seront identifiés comme stables. La figure 13, obtenue par composition colorée de l'intensité des échos radar (grandeur liée à la rugosité et à l'humidité) et de la cohérence interférométrique (sensible à la stabilité), permet de distinguer l'eau (en bleu), la forêt (en vert), les surfaces déboisées (en ocre) et les centres urbains (en jaune) en croisant ces différents critères. Toutefois, contrairement à ce qui a été dit pour les capteurs optiques, l'interprétation des images radar est tout sauf intuitive et ne peut être confiée qu'à des opérateurs très qualifiés.

CONCLUSION

En raison de différences géographiques importantes, les phénomènes naturels et anthropiques qui conduisent à une dégradation de l'environnement et à une intoxication des populations locales par le méthylmercure sont difficilement extrapolables de l'Amazonie brésilienne à la Guyane. Cependant, les conditions naturelles de la méthylation (bas-fond, zone marécageuse) et les causes de la mobilisation du mercure (essentiellement la déforestation, les inondations et l'orpillage) sont associées à des facteurs environnementaux dont on peut au moins localiser l'apparition et surveiller les évolutions. La télédétection permet de mettre en place des moyens pertinents d'observation, à différentes échelles, des impacts environnementaux de la présence et des activités humaines. Par ailleurs, l'imagerie satellitaire ou aérienne, outil de surveillance par excellence, fournit non seulement des informations objectives mais aussi des supports de communication et des pièces à conviction. Toutefois, compte tenu de la diversité des outils de télédétection, un cahier des charges précis tenant compte des spécificités guyanaises devra préalablement être établi.

[Références bibliographiques]

- ANOUILH D., 1995. *La France, la Guyane et la guérilla (1986-1992), implications de la crise surinamienne en Guyane française*. Université de Toulouse-II, GRHI, n° 2, 187 p.
- CORDELLIER S., DIDOT B. (coord.), 1999. *L'état du monde 2000 : annuaire économique, géopolitique mondial*. Paris, La Découverte, 675 p.
- FENSTERMAKER L., MILLER J., 1994. Identification of fluviially redistributed mill tailings using high spectral resolution aircraft data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60 (8) : 989-995.
- FLEURY M., 1998. « Les populations du haut Maroni et le projet de parc national de la Guyane ». In : *Conserver, gérer la biodiversité, quelle stratégie pour la Guyane ?* JATBA, 40 (1-2) : 577-610.
- HURAUULT J. (éd.), 1960. *Rapports de tournées dans l'Inini (Guyane française), période 1936-1942*. Paris, 345 p.
- INSEE, 1999. *Premiers résultats*. Cayenne, INSEE, synthèse n° 15, 4 p.

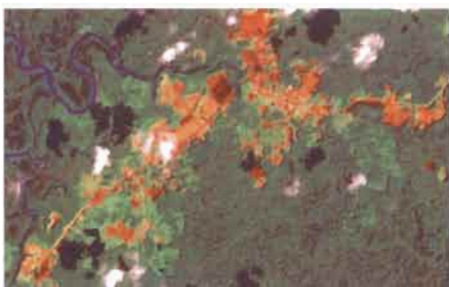


Figure 1

Défrichement agricole au lieu-dit Charvein (nord-ouest de la Guyane). L'identification des petits abattis, qui en Guyane française n'excèdent généralement pas un hectare, nécessiterait des images de résolution plus fine. Le traitement de données fournies par le capteur HRVIR de SPOT-4 à 20 m de résolution permet néanmoins de distinguer les différentes cultures et les divers stades de croissance végétale.
© CNES 1999, traitement IRD.



Photo 1

Déboisement aux environs de Cayenne. À proximité des villes, les défrichements consécutifs à la forte pression foncière entraînent une dénudation totale des sols, même sur les fortes pentes, ce qui les expose au ruissellement, à l'érosion et aux glissements de terrain.
© IRD/A. GARDEL.



Photo 2

Abattis récent à proximité de Saint-Georges-de-l'Oyapock. Cette parcelle a été récemment défrichée puis incendiée, avant sa mise en culture. Le maintien des souches d'arbres sur le sol freine le ruissellement, limite le lessivage, l'érosion et la dégradation des sols.
© IRD/M. TSAÏEM.

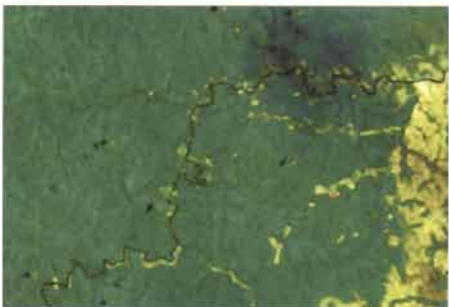


Figure 2

Déforestation le long des cours d'eau en Amapá (Nord-Brésil). La bonne résolution des images Landsat TM (30 m) et l'utilisation de l'infrarouge permettent de mettre en évidence les abattis de petite taille comme en Guyane. Mais la rapidité des défrichements et de la colonisation agricole dans ce secteur nécessitent des observations plus rapprochées, généralement à chaque saison sèche.

Figure 3

Déforestation le long de la transamazonienne au sud de Santarem (Nord-Brésil). L'utilisation des images à large champ et à résolution spatiale kilométrique permet d'observer les grands fronts pionniers de l'Amazonie brésilienne.

La figure 3 a est fournie par le capteur AVHRR, lequel est essentiellement à but météorologique mais peut être accessoirement utilisé pour la cartographie de l'occupation du sol. Sa résolution de 1,1 km est suffisante pour observer des défrichements d'une telle ampleur.

La figure 3 b est issue d'un capteur radar à grande longueur d'onde embarqué sur le satellite JERS-1. Cette image a été dégradée et rééchantillonnée à la résolution de l'image AVHRR. Du fait qu'il s'affranchit des nuages, le capteur radar est particulièrement précieux pour l'observation des régions tropicales.

© NASDA/MITI/JPL, avec l'aimable autorisation de JERS-1SAR Global Rain Forest Mapping Project.



3 a



3 b

Figure 4

La retenue de Petit-Saut vue par satellite.

La figure 4 a est fournie par le satellite SPOT en mode multispectral (résolution de l'ordre de 20 m), en couleurs dites pseudo-naturelles.

© CNES 1998, traitement IRD.

La figure 4 b est fournie par le satellite JERS-1 (image radar à résolution dégradée à environ 100 m).

© NASDA/MITI/JPL, avec l'aimable autorisation de JERS-1SAR Global Rain Forest Mapping Project.



4 a

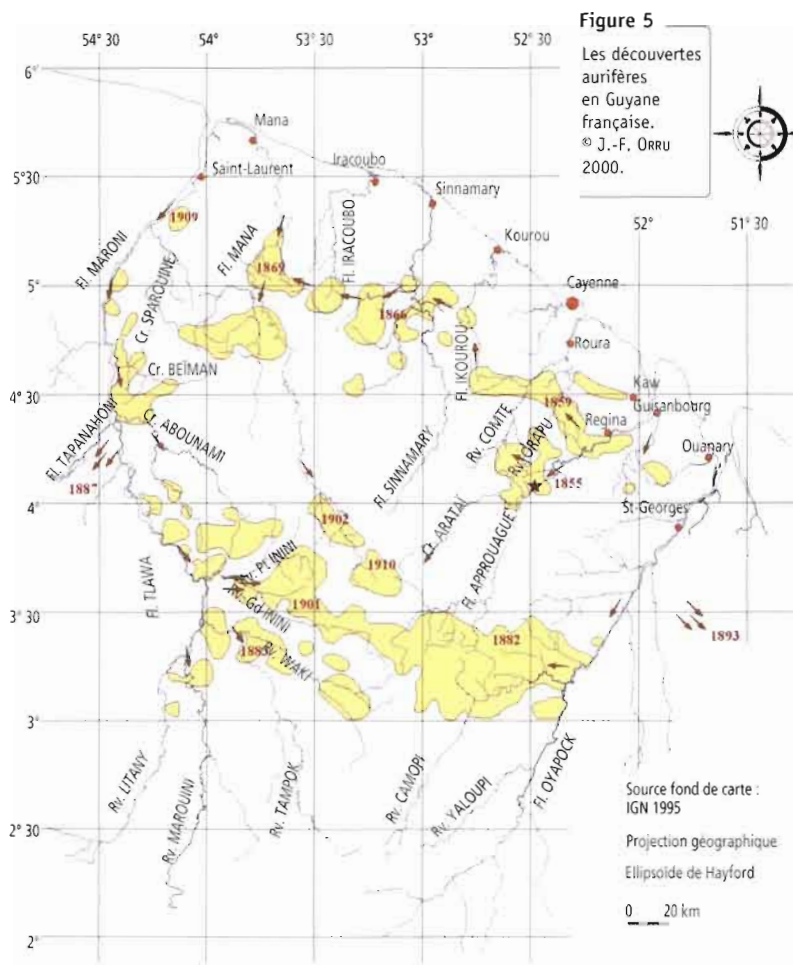


4 b

Figure 6

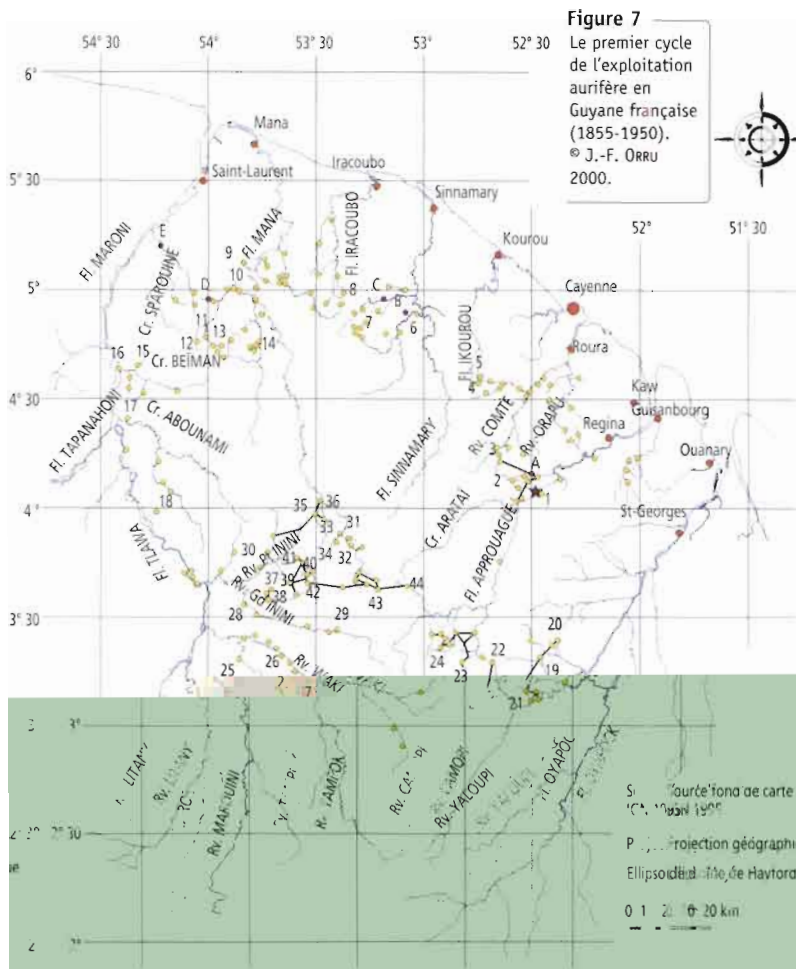
Carte IGN à 1:500 000 à proximité de Santarem (Nord-Guyane). La carte révèle la densité de la topographie, l'abondance des placers miniers et l'ancienneté de l'activité aurifère dans ce secteur. IGN-Paris 1995, autorisation IGN n° GC01-3.





- Bourgs principaux
- Contour des minéralisations
- ★ Première découverte (crique Aïcoupa)
- 1855 Principales étapes des découvertes

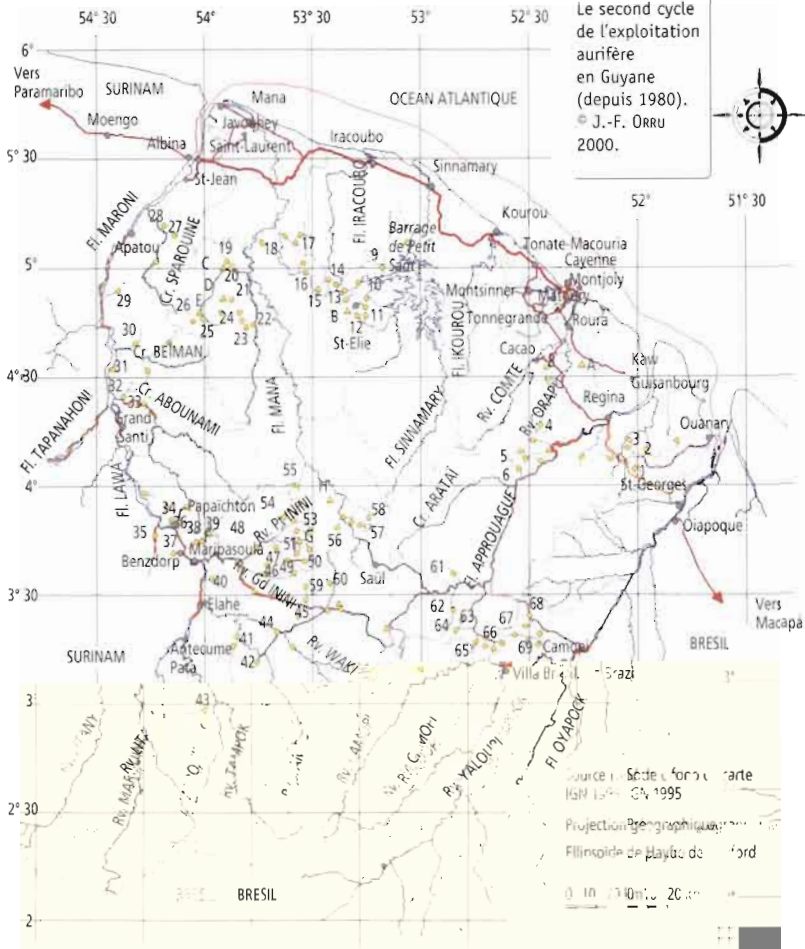
- ↘ Cheminement des orpailleurs
- ↘ Ruées



- ★ Première découverte (crique Aïcoupaï)
- Bourgs de Guyane en 1948
- Principaux placers et villages d'orpailleurs
- Layons des orpailleurs
- Emplacement des dragues à godets

Figure 8

Le second cycle de l'exploitation aurifère en Guyane (depuis 1980).
 © J.-F. ORRU 2000.



Source : Setec pour la carte
 IGN 1:500 000, 1995
 Projection géographique
 Ellipsoïde de Hayford
 0 10 20 30 km

- Réseau hydrographique
- Limites administratives des communes
- Principaux foyers de peuplement
- Routes principales
- Route en cours d'élaboration
- Itinéraire de migration des clandestins
- Layouts des orpailleurs
- Présence de dragues suceuses
- Placers en exploitation
- Permis de recherche de sociétés internationales

Photo 3

Site d'orpaillage récent (barranque Bernardin), dans la crique Dosmond. Sur cet affluent de la rive gauche du Petit Inini, on remarque le mécanisme de fonctionnement de la table, avec l'arrivée du tuyau d'aspiration dans la caisse, puis les siphons inclinés (ici deux). Afin d'éviter les rejets de la table ne s'écoulent dans la barranque en exploitation, des palissades en feuilles de palmier tressées sont disposées sur ce terrain plat. Toutefois, ce dispositif est peu efficace, car les rejets envahissent le terrain.

IRD/J.-F. ORRÚ.



Photo 4

Même site que sur la photo 3, à la saison sèche. L'exploitation est arrêtée faute d'eau pour alimenter les lances monitor. La pompe, destinée à aspirer les alluvions vers la table, est installée sur un radeau fait de fûts métalliques.

IRD/J.-F. ORRÚ.

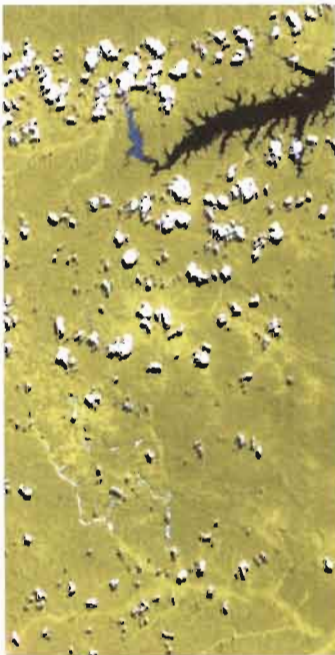


Figure 9

Orpaillage et déforestation dans la région de Saint-Élie. Une image SPOT (extraite de la même scène que la figure 4 a), avec une résolution de 20 m, permet de mettre en évidence les barranques au sud-ouest de la scène. Malgré l'affichage en couleurs pseudo-naturelles (végétation en vert), c'est l'infrarouge qui apporte le contraste entre la forêt et le secteur orpaillé.

↪ CNES 1998, traitement IRD.



Figure 10

Orpaillage et déforestation sur la crique d'Artagnan (Sud-Guyane). Sur cet affluent de la rive gauche du Petit Inini, l'image vidéo acquise en 1998 montre que la majeure partie du flat a été exploitée. Les barranques ne sont pas étanches et se déversent dans le Petit Inini (au nord).

© IRD.

Figure 11

Orpaillage et déforestation en amont de la crique Jadfard (Sud-Guyane). Sur cet affluent de la rive droite du Petit Inini (barranque Koukouman), deux survols vidéo effectués en 1998, à quelques mois d'intervalle, mettent en évidence l'extension rapide des surfaces exploitées.

La plupart des barranques ont perdu leur étanchéité et les alluvions se déversent en aval. La revégétalisation du site, constatée dès la fin de l'année 1998, n'apparaît pas encore sur ces images.

© IRD.



11 a



11 b

Figure 12

Orpaillage et déforestation observés par SPOT en amont de la retenue de Petit-Saut. La composition colorée d'une image SPOT permet de distinguer, par des différences de turbidité, une crique orpaillée (à l'ouest) et une crique non orpaillée (à l'est), en amont de la retenue de Petit-Saut. L'image est représentée en fausses couleurs, telles que les « voit » le capteur (la mesure infrarouge est représentée en rouge, d'où la couleur de la végétation).

© CNES 1998, traitement IRD.



Figure 13

Produit interférométrique issu d'images radar tandem ERS-1/2 de l'Agence spatiale européenne sur un site d'Amazonie brésilienne.

© ESA.

