

# Apport de l'Imagerie Spatiale Optique et Radar pour la Détection et le Suivi des Zones d'Orpaillage en Guyane Française

N. Baghdadi, A. Bourguignon, J. L. Lasserre  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)  
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France  
n.baghdadi@brgm.fr  
Tél. +33 2 38 64 32 02 - Fax +33 2 38 64 36 89

**Résumé :** Les activités minières, parfois clandestines, en Guyane Française sont mal ou pas contrôlées par les autorités. Elles causent des dégâts majeurs à la nature (déboisement sauvage, déversement de mercure, etc.). La recherche d'outils fiables et peu onéreux permettant la cartographie des zones d'orpaillage et le suivi de leurs évolutions dans le temps présente un grand intérêt local. L'objectif de cette étude est d'analyser le potentiel de l'imagerie satellitaire optique et radar pour l'identification et la cartographie des zones d'orpaillage en Guyane française. Des images acquises entre 1990 et 2003 ont ainsi été analysées. L'information issue de l'imagerie satellitaire radar (RADARSAT, SIR-C) et optique (SPOT, LANDSAT) a été étudiée. Les résultats montrent la faible capacité du capteur RADARSAT (mono bande) pour cette application. Quant aux images SIR-C (multi-bandes), elles fournissent une meilleure détection des zones d'orpaillage.

L'interprétation réalisée sur les images SPOT et LANDSAT montre que les capteurs optiques constituent le meilleur outil pour la cartographie de cette activité. L'intérêt des séquences multi-dates pour cartographier l'évolution du paysage soumis depuis quelques années à d'importantes modifications dues à l'activité des orpailleurs a été démontré. De même, on peut procéder à des contrôles pour déterminer si les exploitations cartographiées sont légales ou clandestines et si le concessionnaire exploite la surface allouée par le permis (localisation et étendue).

**Mots-clés:** Zones d'orpaillage, Imagerie Satellitaire radar et optique, Guyane Française.

**Abstract :** Mining activity in French Guiana, illegal in some cases, is poorly or not at all controlled by local authorities. Such activity can cause severe damage to nature (illicit deforestation, mercury spillage, etc.).

The search for reliable and low-cost tools capable of

mapping gold washing sites and monitoring their evolution with time consequently presents a major local interest. The aim of the present study is to assess the potential of optical (SPOT, LANDSAT) and radar (RADARSAT, SIR-C) satellite imagery in identifying and mapping gold washing sites in French Guiana. Images acquired between 1990 and 2003 were analysed for this purpose. The results reveal that the RADARSAT sensor (single band) offers a low detection capacity, whereas the SIR-C images (multi-band) enable a better detection of gold washing sites. Interpretations based on SPOT and LANDSAT images show that optical sensors are more suited to mapping this type of activity. The advantage of multi-date sequences is demonstrated for mapping landscape evolution related to the major modifications inflicted over recent years due to gold washing activities. Similarly, it can be used as a basis for checking whether the mapped workings are legal or not, and whether the claim holder only exploits the area allocated by his permit (location and extent).

**Keywords :** Gold washing sites, optical and radar satellite imagery, French Guiana.

## 1. Introduction

La cartographie des zones d'orpaillage constitue une préoccupation majeure pour les autorités territoriales qui est satisfaite aujourd'hui par des photos aériennes ou par des interventions à intervalle irrégulier sur le terrain. Ces opérations coûteuses et lourdes à mettre en œuvre seraient facilitées et leur planification optimisée par la mise en place d'un suivi via les images satellitaires ce qui faciliterait la tâche des gestionnaires et constituerait un outil efficace d'aide à la décision. La télédétection permet d'acquérir des données décrivant la surface du Globe de façon répétitive, programmable et relativement peu onéreuses.

Si la cartographie des zones d'orpaillage devait être faite à un intervalle de temps régulier et court,

l'acquisition d'images optiques paraît alors problématique compte tenu du climat tropical humide qui règne dans cette région et la présence très fréquente des nuages. Les capteurs radar dits imageurs tout temps permettent quant à eux de s'affranchir des conditions climatiques, ce qui présente un grand avantage lorsque les observations sont impératives quelle que soit la saison. En plus, les capteurs radars qui sont très sensibles à la rugosité de surface, sont susceptibles de traduire la présence des sites d'orpaillage grâce à des coupes dans la forêt ou à un travail du sol.

Dans le but de détecter et de suivre les variations spatiales des zones d'orpaillage, des images satellitaires de type radar et optique seront analysées pour spatialiser des phénomènes supposés être liés à l'activité d'orpaillage (déforestation, petites zones inondées...). L'étude devra montrer l'apport qu'il est actuellement légitime d'attendre des outils de télédétection pour ce type d'application. Le type de capteur approprié (radar et/ou optique) à cette application sera défini en fonction de son potentiel de cartographie. Gond et Nasi (2003) ainsi que Polidori et al., (2001) ont montré le potentiel des images optiques pour la cartographie des zones d'orpaillage en Guyane.

Le but de l'étude est d'étudier le potentiel de l'imagerie radar issue des capteurs RADARSAT et SIRC et de l'imagerie optique issue de SPOT et LANDSAT pour la détection et la cartographie des zones d'orpaillage. Le couplage de l'imagerie avec la carte des permis miniers permettra de montrer la possibilité de réaliser un contrôle de l'activité : (1) cartographie des exploitations clandestines, (2) contrôle de l'activité légale (localisation et étendue de la zone de permis). Des images acquises entre 1990 et 2003 ont été étudiées avec différents paramètres d'acquisition. Dans cet article, nous présenterons successivement une description des zones d'études et des données utilisées, l'interprétation des images radar et optique et les résultats obtenus de la cartographie.

## 2. L'orpaillage en Guyane

### 2.1 Historique de l'activité d'extraction

La découverte de l'or en Guyane en 1857 a rapidement provoqué une ruée vers l'intérieur avec d'abord une multiplication des chantiers artisanaux (orpaillage à la batée) puis à partir de 1880 l'installation de nombreuses sociétés industrielles à gros moyens (exploitation en lit vif par draglines, dragues à godets et exploitation à terre en éluvions).

La production va rapidement s'accroître pour culminer à 5 tonnes en 1894. Cependant à partir de la première guerre mondiale, le déclin de l'activité minière s'amorce jusqu'à son quasi-arrêt entre 1965 et 1985.

Une relance de la production s'amorce alors avec une production essentiellement assurée par l'extraction alluvionnaire et qui remonte au niveau des productions historiques : 3,5 tonnes en 2000, 4 tonnes en 2001 (production déclarée). A partir de 1992, apparition puis rapide extension en Guyane de l'exploitation en barranques d'origine brésilienne. Cette exploitation souvent effectuée sur des chantiers clandestins a un fort impact environnemental : dispersion du mercure dans le milieu naturel, rejets d'eaux de lavage très chargées en matières en suspension directement dans les cours d'eaux.

Entre 1855 et 2002, la production officiellement déclarée d'or en Guyane est de 205 tonnes.

### 2.2 Les enjeux de cette activité en Guyane

L'extraction aurifère représente le second secteur de production en Guyane après le spatial. La production est repartie à la hausse depuis 1990 et a atteint 4000 kg en 2001 (production déclarée). Cependant cette production est essentiellement le fait d'une extraction dans le lit alluvionnaire plat d'une rivière (flats). De plus une grande partie de la production n'est pas déclarée car réalisée sur des sites d'orpaillage clandestins. De fait la production réelle, intégrant production effective des sites déclarés et production des sites illégaux, est très certainement supérieure à 10 tonnes par an.

Cette production doit évoluer dans les toutes prochaines années avec la mise en exploitation de gisements primaires à minerai oxydé qui se fera en carrière avec traitement du minerai par cyanuration en cuve. Ces mines industrielles comme Camp Caïman seront exploitées et gérées selon les standards industriels et environnementaux internationaux.

### 2.3 Les problèmes générés par l'orpaillage clandestin

Réalisée dans un cadre d'activité industrielle normale et régulière conforme aux règles de l'art, l'extraction aurifère représenterait un secteur d'activité et de développement économique très important pour la Guyane.

Cependant, l'activité clandestine importante ne génère pas les retombées socio-économiques normales d'une activité régulière mais au contraire elle

est à l'origine de graves problèmes environnementaux, sanitaires et sociaux.

En effet, l'orpaillage clandestin réalisé sans gestion environnementale des chantiers d'extraction a pour conséquence la dispersion dans le milieu du mercure utilisé pour l'amalgamation au cours des 150 ans d'activité d'orpaillage et encore actuellement. Ce mercure peut ensuite être confiné dans des conditions physico-chimiques permettant sa transformation en méthyl-mercure hautement toxique puis sa re-concentration au long de la chaîne alimentaire jusqu'à des niveaux de toxicité élevés dans certains poissons consommés par la population. Ce problème de santé public fait depuis plusieurs années l'objet d'études scientifiques importantes (Gramick et al., 1998 ; Deheeger et al., 2000).

De même le rejet des eaux de lavage des minerais dans les cours d'eau sans dispositif de décantation génère une importante turbidité des eaux et une altération importante et durable de l'écosystème aquatique. En effet les panaches d'eaux turbides s'étendent sur des distances très importantes en aval des sites étendant ainsi la zone affectée par l'impact des chantiers d'orpaillage bien au-delà du secteur exploité.

Les atteintes à l'écosystème forestier sont également importantes avec déforestation, destruction des sols, absence de réhabilitation des sites (pas de comblement des barranques, pas de restauration des sols, pas de revégétalisation, pas de restauration du cours d'eau, pas de gestion des déchets).

#### 2.4 Les méthodes d'extractions: artisanale et industrielle

L'extraction traditionnelle développée jusque vers 1990 consistait à creuser à la main une fosse de 6-7m x 3-4m dans le lit d'un cours d'eau à quelque distance de la rivière pour éviter l'inondation du chantier. Le recouvrement stérile (parfois plusieurs mètres) une fois extrait, la couche de graviers minéralisée était à son tour extraite pour être lavée à la batée. Ce type de travail artisanal n'a pas généré un impact fort sur le milieu aquatique en particulier. Par contre il a contribué à la dispersion de mercure dans le milieu tout comme l'activité des sociétés industrielles qui ont extrait l'or de 1880 à 1920.

Ces sociétés ont pratiqué l'extraction des minerais alluvionnaires (dragues à godets dans les grands flats) mais aussi à terre avec des essais de mines souterraines exploitant des filons de quartz aurifères (Régions de St-Elie, de Paul-Isnard, de Saül ou d'Adieu-Vat)

Actuellement l'extraction artisanale se développe essentiellement dans les flats des cours d'eaux (accumulations alluvionnaires dans le lit vif des rivières). Cette extraction se pratique selon la technique brésilienne des « barranques » qui comprend les phases suivantes :

- déforestation et décapage du site avec détournement du cours d'eau,
- ouverture de fosses d'exploitation dans le flat par décapage de la couverture stérile argileuse à la pelle hydraulique,
- abattage des graviers et sables minéralisés à la lance "Monitor" (jet d'eau à haute pression),
- pompage des matériaux en suspension dans l'eau par la pompe à graviers et alimentation de la "caisse" (dispositif constitué d'un canal incliné tapissé d'une moquette et surmonté d'une grille métallique permettant le piégeage gravimétrique de l'or),
- récupération des particules d'or par démontage de la caisse puis lavage des moquettes,
- amalgamation au mercure du concentré et constitution de l'amalgame or-mercure,
- distillation de l'amalgame dans une retorte ou au four avec récupération d'une éponge d'or, la cassave.

L'absence de gestion environnementale des chantiers dans le déroulement de ces différentes étapes génère de multiples impacts sur le milieu naturel dont les effets persistent souvent longtemps après l'arrêt des chantiers et affectent des secteurs débordant largement le périmètre des sites miniers.

Rappelons aussi que l'extraction de l'or dans les alluvions du lit vif des cours a été pratiquée au moyen de dragues suceuses avec des plongeurs. Cette activité illégale (interdite par la Loi sur l'Eau) a quasiment disparue actuellement mais a été largement pratiquée entre 1980 et 1995. Elle a entraîné une forte dégradation du lit des fleuves et rivières et un impact important sur le milieu aquatique.

L'exploitation des gisements d'or primaire est conduite à terre selon une technique similaire à l'extraction en carrière. Les terrains stériles sont extraits, évacués et stockés de manière à pouvoir être réemployés lors de la réhabilitation du site. Le minerai extrait de la carrière est concassé, broyé finement puis dans un réacteur, une solution diluée de cyanure est ajoutée afin de dissoudre l'or. La solution enrichie en or passe ensuite sur une colonne de charbon actif permettant la destruction du complexe aurifère soluble et la précipitation de l'or

métal. Il n'existe pas actuellement de sites industriels actifs de ce type. Le premier (Camp Caïman) pourrait voir le jour vers 2006 - 2007.

### 3. Sites d'étude et données utilisées

Trois sites d'études ont été choisis en Guyane française (cf. Fig. 1): le premier (S1) est situé dans la région de Paul Isnard (long. : 54°06'W à 53°39'W et lat. 05°07'N à 04°40'N), le second (S2) dans la région de Saül (long. : 53°37'W à 53°10'W et lat. 04°02'N à 03°35'N), et le dernier (S3) dans la région d'Appouague-Montagne de Kaw (long. : 52°36'W à 52°03'W et lat. 04°42'N à 04°01'N) :

#### *Site de Paul Isnard : Nord de la Guyane*

Découverte en 1873 la région aurifère de Paul Isnard est toujours productrice. Elle a été l'objet de toutes les méthodes d'extraction : exploitation des grands flats par drague sur barge, orpillage traditionnel artisanal, activité ancienne de mine sur filon de quartz aurifère, exploitation actuelle de type « barranque » brésilienne.

#### *Site de Saül : Centre de la Guyane*

La région de Saül dans le centre de la Guyane a aussi été l'objet d'une activité d'orpillage très tôt dès le milieu du 19ème siècle. Cette région comprenant la partie amont du bassin du fleuve Mana a vu se développer ces dernières années une activité extractive très importante dans les flats de la Mana (barranques) ainsi qu'une extraction par barge avec drague suceuse. Ces activités en grande partie clandestines et réalisées sans préoccupation de gestion environnementale laissent des altérations importantes sur l'environnement.

#### *Site du fleuve Appouague : Est de la Guyane*

Cette région est celle de la découverte historique de l'or en Guyane. Les activités d'orpillage s'y poursuivent (barranques) avec de multiples chantiers légaux et illégaux. Il faut noter que certains exploitants légaux commencent à mettre en œuvre une gestion plus rationnelle de leur chantier et prendre en compte les questions de gestion environnementale et de réhabilitation de site. Ce type de site présente une organisation qui doit permettre de le distinguer des sites illégaux exploités très rapidement (en raison d'une menace de plus en plus forte d'intervention de la gendarmerie pour interrompre ces chantiers) sans aucune préoccupation de préservation du milieu naturel ni tentative de réhabilitation après exploitation.

Le climat en Guyane est de type équatorial. A l'exception d'une étroite frange côtière, la Guyane est entièrement couverte par la forêt amazonienne. Elle est parcourue par un réseau hydrographique très dense, tandis que le réseau routier est très peu développé en dehors des grandes villes côtières (Cayenne, Kourou,...). Les campagnes terrain sont donc très difficiles à mettre en œuvre et demandent des moyens appropriés. L'activité minière très gourmande en eau se développe en générale à proximité du réseau hydrographique (fleuves, rivières et cours d'eau).

Les sites d'étude sont constitués de forêt vierge avec un relief modéré.

Pour cette étude, nous disposons d'images spatiales acquises par différents capteurs optique et radar (Tableau 1) et de la carte des permis miniers.

Quatre images LANDSAT (5 et 7), 2 images SPOT 4, 4 images RADARSAT-1 et une image SIR-C ont été utilisées dans le cadre de cette étude. L'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow est la seule à couvrir les trois sites d'étude mais avec une résolution spatiale de 50 m (300 km x 300 km). Les dates d'acquisitions s'étalent de 1990 à 2003.

Afin de les rendre exploitables pour l'analyse thématique, les images radar et optique ont été géoréférencées dans le système géodésique Guyanais CSG67 à l'aide des cartes topographiques de l'IGN au 1:25 000 disponibles sur les régions côtières. Pour référencer les images de Saül qui ne sont pas couvertes par les cartes IGN, nous avons utilisé l'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow référencée uniquement à partir des cartes topographiques des régions côtières (cette image couvre les trois sites). Le référencement absolu des images de Saül n'est donc pas optimal tandis que le référencement relatif d'une image à l'autre est de quelques pixels seulement.

**Tableau 1.** Caractéristiques des images radar et optique utilisées.

Date JJ/mm/aa	Capteur	Nombre De bande	Mode-Incidence	Résolution Spatiale (m)	Sites D'étude
24/07/90	LANDSAT 5	7	-	30/120	S2/S3
03/08/97	LANDSAT 5	7	-	30/120	S1
19/09/02	LANDSAT 7	7	-	30/60/15	S2/S3
26/09/02	LANDSAT 7	7	-	30/60/15	S1
15/08/99	SPOT 4	4	-	20	S3
02/07/01	SPOT 4	4	-	20	S3
07/04/01	RADARSAT	1	F2-41°	10	S3
20/06/02	RADARSAT	1	S7-47°	25	S3
17/07/02	RADARSAT	1	S2-28°	25	S3
29/12/02	RADARSAT	1	ScanSAR Narrow 20° à 46°	50	S1/S2/S3
02/05/94	SIR-C	4 LHH,LHV CHH,CHV	59°	25	S3

## 4. Potentiel cartographique des images optique et radar

### 4.1 Interprétation des images optiques

La photo-interprétation des images a été réalisée conjointement avec la carte des permis. Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (forme) ainsi que leur localisation géographique dans l'image.

Une interprétation de l'image LANDSAT du 19/09/2002 a été réalisée. Un segment de l'image est montré sur la Figure 2. Il s'agit d'une composition colorée utilisant les canaux 4 (0.76-0.9  $\mu\text{m}$ , proche infrarouge), 3 (0.61-0.69  $\mu\text{m}$ , rouge) et 2 (0.53-0.61  $\mu\text{m}$ , vert) correspondant respectivement aux filtres rouge, vert et bleu. Les surfaces couvertes de végétation essentiellement forestière apparaissent de couleur rouge soutenue. Les teintes claires variant du blanc au vert ou au bleu représentent des zones de sols dénudés correspondant aux zones d'orpaillage. Les retenues d'eau qui se trouvent à l'intérieur des exploitations sont en teinte foncée (quelques points noirs). On distingue également des teintes rouge clair qui peuvent être attribuées à des zones de régénération de la végétation après une période de dénudation.

L'étude des images optiques montre qu'il est possible visuellement de différencier les zones d'orpaillage. Ce sont en effet des zones de sols dénudés et même si leur taille est limitée, leur couleur claire offre un contraste fort avec la végétation rouge sombre ce qui permet de les localiser aisément. Pour un traitement plus automatique qui permettrait leur extraction de l'image, plusieurs difficultés sont à prendre en compte. En effet la couverture nuageuse abondante dans les régions équatoriales perturbe la classification de l'image et rend difficile l'application de traitements automatiques pour isoler les zones d'orpaillage. Le NDVI, indice de végétation, permet d'extraire des zones sans végétation mais les nuages, leur ombre et les zones de cultures sont représentées de manière semblable en teinte foncée sur l'image résultante (Figure 3). Des indices combinant différents canaux ont également été appliqués sur l'image LANDSAT du 19/09/2002. Ils n'ont pas permis d'enlever toutes les ambiguïtés entre les zones d'orpaillage, les zones de culture, les nuages et leur ombre. Le rapport entre canal 5 (moyen infrarouge) et canal 1 (bleu) a permis une bonne discrimination entre les zones d'orpaillage et les nuages et leur ombre. Toutefois il n'y a pas de discrimination de teintes entre sols nus cultivés et zones d'orpaillage.

Seuls des critères de forme permettent d'individualiser les zones d'orpaillage des zones de cultures. En effet, les zones d'orpaillage ont des formes linéaires alors que les zones agricoles sont parcellaires et présentent des formes plus géométriques (Figure 3).

Une analyse en composantes principales (ACP) a été également réalisée. La première composante de l'ACP représente 94.5% de l'information contenue dans l'image. L'image résultante permet la discrimination visuelle des sites d'orpaillage qui apparaissent en bleu sur la composition RGB (Figure 4). Les nuages de teinte violet et leur ombre en rouge sont bien individualisés par rapport aux zones dénudées mais la confusion avec les sols nus cultivés persiste sauf si l'on prend en compte la similitude des formes entre les nuages et leur ombre pour les distinguer des sols nus cultivés. L'utilisation de cette image apporte donc essentiellement une lisibilité améliorée par rapport à l'image spectrale brute.

La comparaison entre les images acquises à plusieurs dates montre l'évolution du paysage Guyanais suite aux activités d'orpaillage. En effet, certaines zones se sont agrandies et d'autres ont disparu (Figures 5 et 6, respectivement). Les compositions colorées utilisent soit les canaux 4 (0.76-0.9  $\mu\text{m}$ , proche infrarouge), 3 (0.61-0.69  $\mu\text{m}$ , rouge) et 2 (0.53-0.61  $\mu\text{m}$ , vert) ou bien les canaux 5 (1.57-1.78  $\mu\text{m}$ , moyen infrarouge), 4 et 2 correspondant respectivement aux filtres rouge, vert et bleu. On constate à partir de l'imagerie que les sites d'orpaillage étaient presque inexistantes en 1990 et que l'activité a progressé entre 1999 et 2002. L'activité minière a commencé à prendre un grand essor à partir de la deuxième moitié des années 90. La Figure 6 montre un site d'activité actif en 1997 et qui ne l'est plus en 2002 car l'image de 2002 montre une repousse de la végétation.

### 4.2 Interprétation des images radar

La Figure 7 montre la réponse du signal radar à différents angles d'incidence sur une importante zone d'orpaillage (site S3), en comparaison à l'image LANDSAT. Les images RADARSAT en modes Fine et Standard (résolution spatiale de 10m et 25m, respectivement) ne montrent pas d'influence nette de l'angle d'incidence sur le résultat de la détection. Sur les images radar, on observe à l'endroit des zones d'orpaillage quelques pixels de faible radiométrie qui correspondent à la diffusion spéculaire du signal radar sur l'eau des «barranques» (cf. Figure 7). Cette observation est sans ambiguïté si le site d'orpaillage est assez grand. L'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow (résolution spatiale de 50m),

n'apparaît, elle, pas du tout adaptée à ce type de cartographie. Quant à l'image SIR-C, elle laisse supposer que ce site d'orpaillage est postérieur à 1994, date d'acquisition de l'image (cf. Figure 7).

En conclusion, la cartographie des sites d'orpaillage par l'imagerie radar de type mono-bande (comme c'est le cas pour RADARSAT) reste assez difficile. Les résultats obtenus montrent une modeste corrélation entre l'imagerie radar et l'imagerie optique pour cette grande exploitation.

La Figure 8 montre l'apport des images radar multi-fréquences (bandes C et L) et multi-polarisations (HH et HV) pour la détection des zones d'orpaillage. Les deux zones d'orpaillage identifiées sur l'image SIR-C correspondent bien à un permis légal. Cette image SIR-C montre en particulier le fort potentiel des images radar en bande L multi-polarisations. Sur l'image SIR-C, les zones d'orpaillage apparaissent en teinte rouge avec quelques points noirs. On constate cette même radiométrie à d'autres endroits, sur des pixels isolés, sans que ça corresponde forcément à des zones d'orpaillage. Cependant, il est possible de détecter avec des capteurs radar adéquats les zones d'orpaillages si celles-ci s'étendent sur une large surface (plusieurs dizaines de pixels).

Sur les images RADARSAT en modes Fine et Standard, on distingue les zones d'orpaillage par une teinte noire (cf. Figure 8). Cette détection est moins évidente comparativement à celle obtenue par les capteurs optiques ou par le capteur radar de type SIR-C (multi-fréquences et multi-polarisations).

## 5. Contrôle de l'activité

Dans le cadre de cette étude, nous avons étudié la possibilité de contrôler la légalité des concessions et de vérifier l'exactitude des données liées à l'étendue des concessions et à leur localisation. Ce travail nous permet également de détecter les concessions clandestines.

Ce travail de vérification a pu être réalisé grâce à la carte des permis miniers. Les Figures 9 et 10 montrent que l'extension de deux zones d'orpaillage détectées à proximité des permis est bien supérieure à la surface autorisée qui est de 1 km x 1 km. En effet, la surface exploitée est au moins trois fois supérieure à la surface légale. L'exploitation de la Figure 9 s'étend sur environ 2.8 km de long et au moins 0.7 km de large (l'image ne couvre qu'une partie de la zone nord). De même, la concession de la Figure 10 montre que la zone exploitée est d'environ 1.7 km x 1.9 km. Pour cette exploitation qui est plutôt éparpillée, on peut émettre deux hypothèses : (1) le concessionnaire exploite au delà

des limites autorisées, ou bien (2) il y des exploitants clandestins aux alentours de l'exploitation légale.

La Figure 11 montre des exemples illustrant des activités clandestines dans la région de Paul Isnard (S1) car les zones d'orpaillage observées par télédétection sont très loin des concessions légales les plus proches (environ 10km). Les deux zones d'orpaillage n'apparaissent pas sur l'image LANDSAT du 03/08/1997, ce qui laisse penser que l'activité est postérieure à cette date.

Les erreurs de référencement des images satellitaires ne mettent pas en cause ces observations car elles sont de quelques dizaines de mètres dans les endroits où des points de calage ont été trouvés et de quelques centaines de mètres dans les zones où l'on ne disposait pas de points de calage proches. C'est pour cette raison que seules les zones présentant une anomalie cartographique de plusieurs km ont été discutées.

## 6. Conclusion et perspectives

Le contrôle et la gestion des ressources minières en Guyane nécessite des moyens de cartographie adaptés pour suivre l'évolution dans le temps des activités d'orpaillage. L'objectif de cette étude était d'étudier le potentiel des images radar et optique pour la cartographie des zones d'orpaillage, en privilégiant l'établissement d'un diagnostic rapide, pour proposer un outil opérationnel de localisation des zones d'activité. La détection des zones d'orpaillage au moyen d'images radar mono-bande, de type RADARSAT par exemple, n'est pas apparue concluante. Quant aux images radar multi-bandes, comme SIR-C par exemple, elles semblent fournir une bonne détection des zones d'activité. Cependant, l'imagerie optique permet la meilleure détection de ces zones. Dans un tel contexte, les images satellitaires de type optique peuvent constituer un outil privilégié d'acquisition d'information actualisée et répétitive susceptible de fournir une information de suivi utile pour les décideurs. Les images spatiales pourraient ainsi permettre la constitution d'une base de données indispensable à la gestion des ressources et à la surveillance de l'environnement.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de cartographier les activités aurifères clandestines et de contrôler l'étendue des concessions légales. L'utilisation de l'imagerie satellitaire permet un diagnostic rapide et relativement peu onéreux par rapport à la photo aérienne ou à des méthodes de terrain conventionnelles.

Pour une meilleure détection de ces zones,

l'acquisition des images avec des hautes résolutions spatiales est nécessaire. L'imagerie RADARSAT en mode ScanSAR par exemple (50m de résolution) n'est pas du tout adaptée. L'influence de l'angle d'incidence radar sur le potentiel de détection ne semble pas déterminante.

Les nouveaux capteurs radar (ASAR d'ENVISAT) sont multi-polarisation, et ceux qui seront lancés prochainement seront polarimétriques (RADARSAT 2 par exemple), ce qui va sans doute permettre une meilleure caractérisation des zones en activité d'orpaillage. Le potentiel des nouveaux capteurs radar et optique (ASAR et SPOT 5) doit être étudié. La fine résolution spatiale de SPOT 5 et les configurations multi-incidence et multi-polarisation d'ASAR vont sans doute améliorer notre expertise actuelle sur la cartographie de l'orpaillage en Guyane. Des images hyperspectrales issues du capteur HYPERION pourront également être analysées dans le but d'étudier la corrélation entre sites pollués et informations spectrales (sol et eau).

De même, il est nécessaire de réaliser un SIG montrant l'évolution temporelle de l'activité d'orpaillage et comparant ce qui est cartographié par télédétection et ce qui est inventorié comme étant des exploitations légales. Les sites clandestins pourront ainsi être inventoriés.

## Références

- Deheeger M., Fréry N., Boudou A. et Maury-Brachet R. (2000). Enquête alimentaire pour mesurer l'exposition au mercure de la population amérindienne Wayana de Guyane. *Information Diététique*, vol. 2, pp. 28-32.
- Gond V. et Nasi R. (2003) L'orpaillage observé par satellite. *Cirad-info*, no. 133 (mars 2003), pp. 3.
- Grasmick C., Cordier S., Fréry N., Boudou A. et Maury-Brachet R. (1998). La pollution mercurielle liée à l'orpaillage en Guyane : contamination des systèmes aquatiques et impact sanitaire chez les amérindiens du Haut-Maroni. *JATBA, Revue d'Ethnobiologie*, vol. 40 (1-2), pp. 167-179.
- Polidori L., Fotsing J.M., et Orru J.F. (2001) Déforestation et orpaillage : apport de la télédétection pour la surveillance de l'occupation du sol en Guyane française. in *Le mercure en Amazonie. Rôle de l'Homme et de l'environnement, risques sanitaires* (coord. Scientifique : Carmouze J.P., Lucote M., Boudou A. Paris, IRD Editions, pp. 473-494.

## Remerciements

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par la Direction de la Recherche du BRGM. Certaines images Radarsat ont été fournies gratuitement par RSI dans le cadre du projet ADRO-2. De même une partie des images a été acquise dans le cadre du programme PNEC.

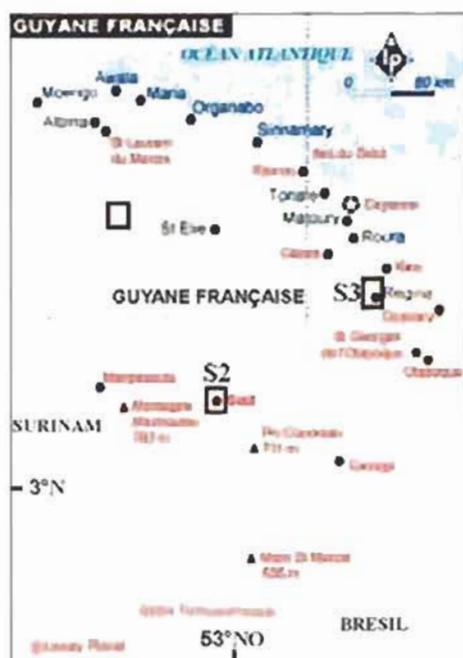


Fig. 1 Localisation des trois sites d'études : S1 (Paul Isnard), S2 (Saul), et S3 (Approuague - Montagne de Kaw).

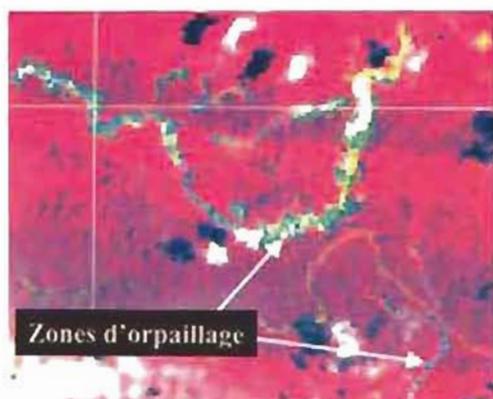


Fig. 2 Segment de l'image LANDSAT acquise le 19/09/2002. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude d'Approuague-Montagne de Kaw (S3), échelle ~ 1:100 000 (RGB = PIR,Rouge,Vert)

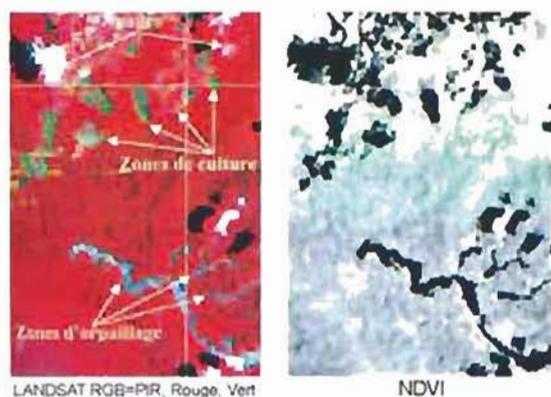


Fig. 3 Illustration de la confusion entre sols nus cultivés et zones d'orpillage pour l'image LANDSAT du 19/09/2002.

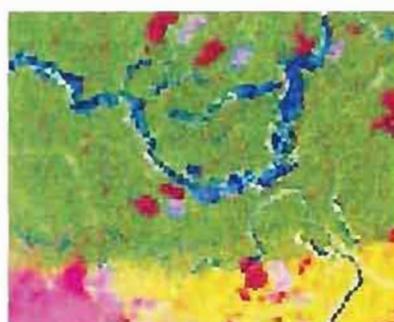
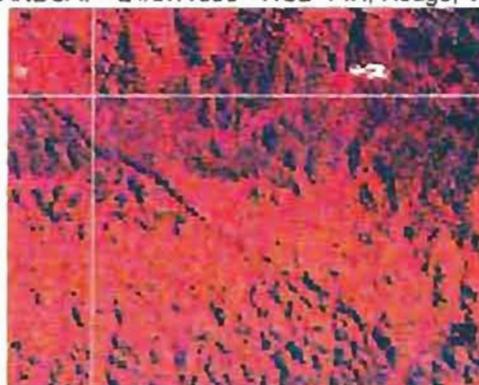
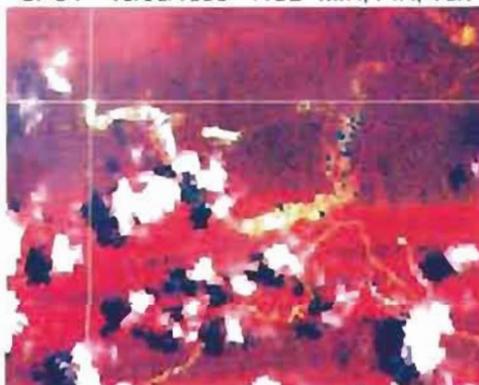


Fig. 4 Composition colorée issue des composantes principales calculées sur l'image du 19/09/2002 (RGB=ACP4,ACP2,ACP1)

LANDSAT - 24/07/1990 - RGB=PIR, Rouge, Vert



SPOT - 15/08/1999 - RGB=MIR, PIR, Vert



LANDSAT - 19/09/2002 - RGB=PIR, Rouge, Vert

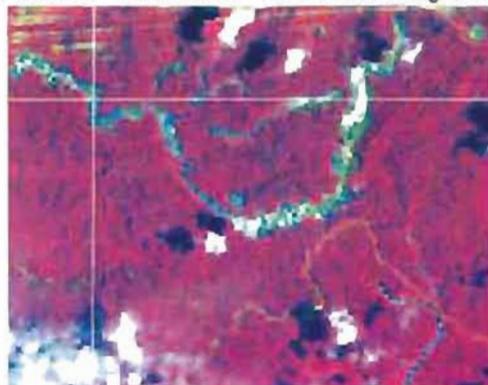


Fig. 5 Exemple de l'évolution du paysage Guyanais suite aux activités d'orpillage. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude d'Approuague - Montagne de Kaw (S3).

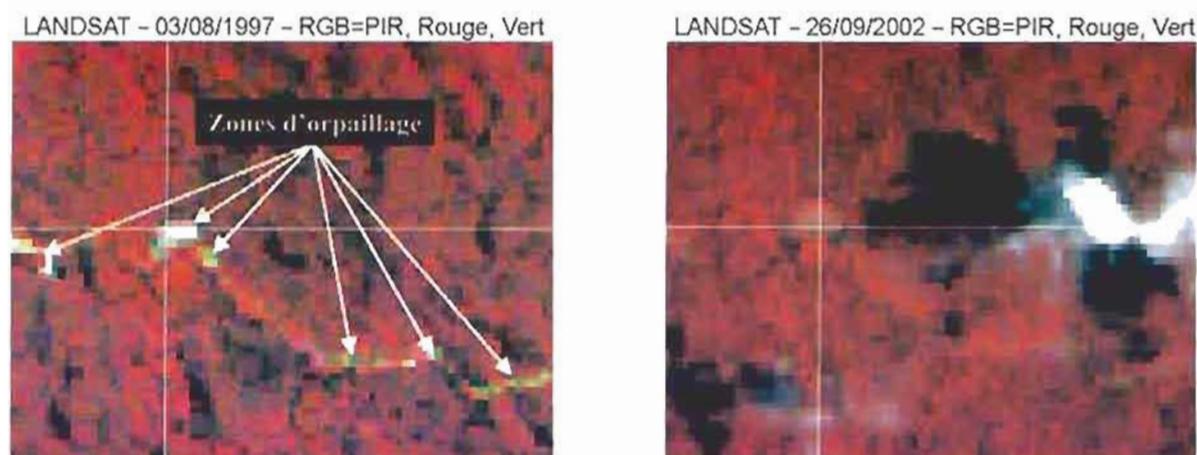


Fig. 6 Exemple de la régénération de la végétation suite à l'arrêt d'un site d'orpaillage. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude de Paul Isnard (S1).

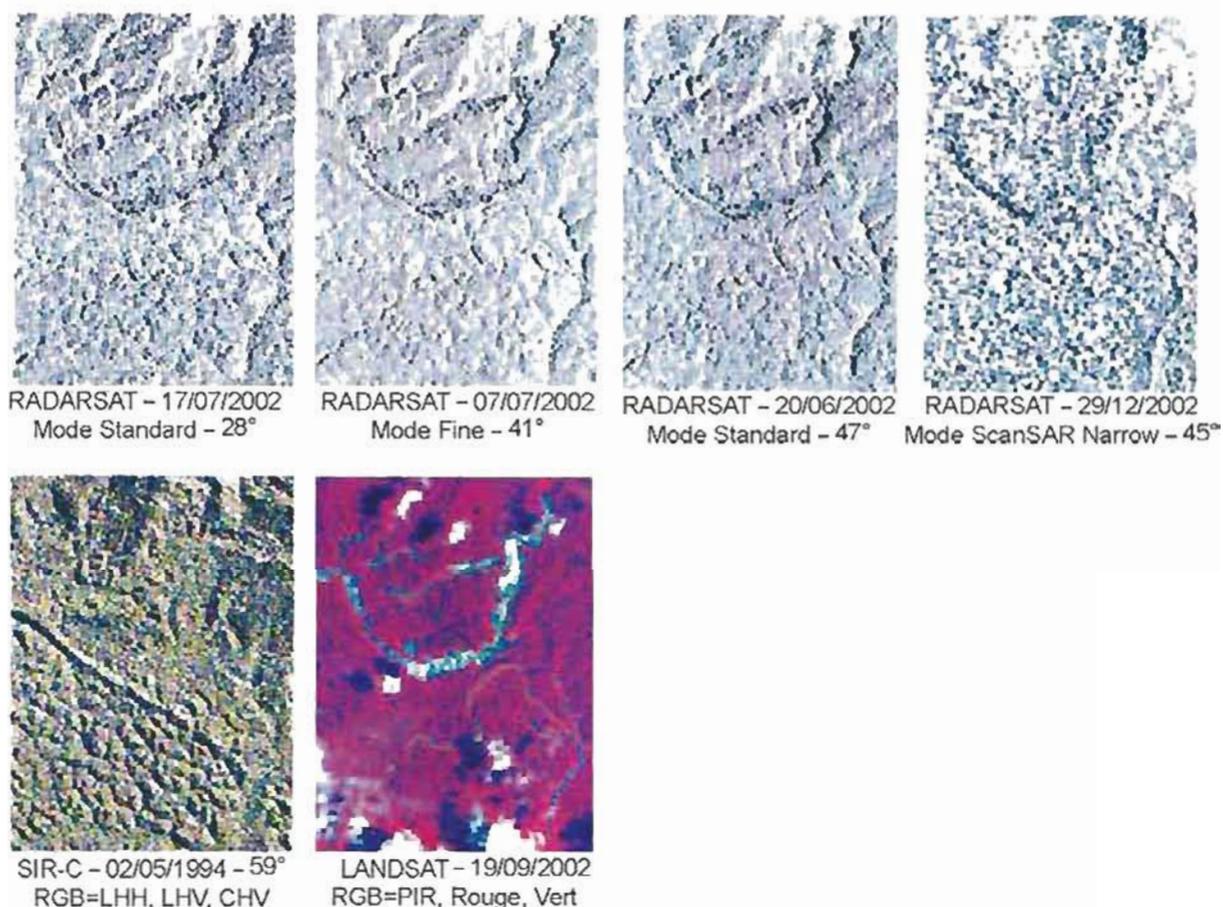
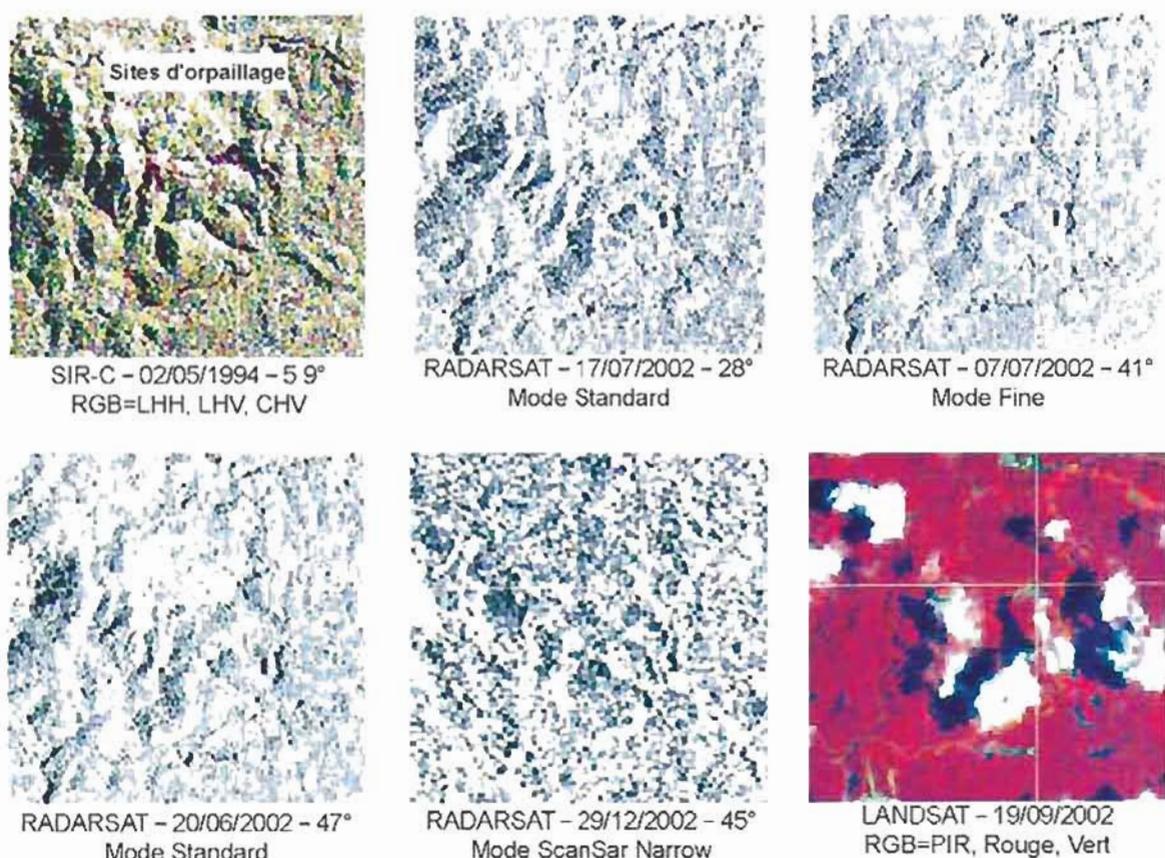
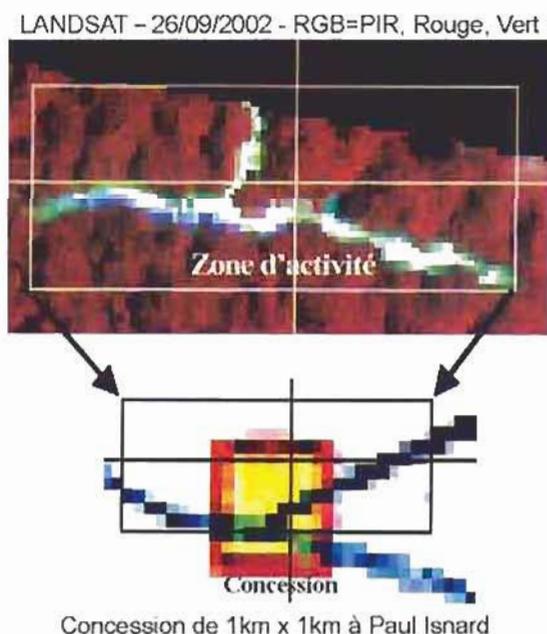


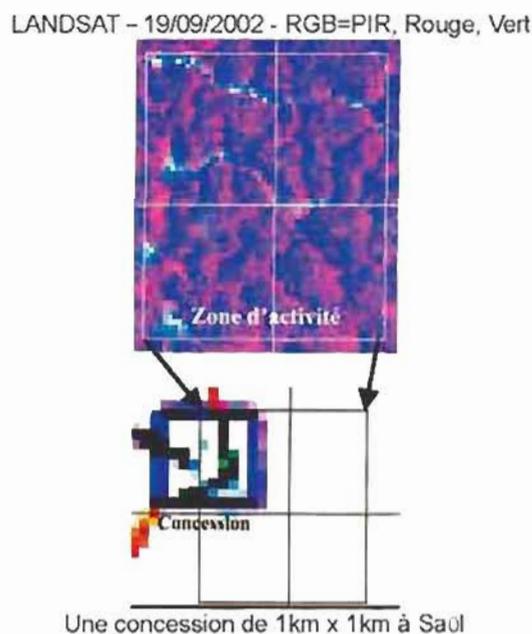
Fig. 7 Comparaison entre imagerie radar (RADARSAT et SIR-C) et imagerie optique (LANDSAT) pour un site d'orpaillage bien répertorié dans la région d'Approuage Montagne de Kaw échelle - 1:200 000.



**Fig. 8** Potentiel de l'image SIR-C pour la cartographie des zones d'orpaillage. Cet exemple montre que l'imagerie radar multi-fréquences (C et L) et multi-polarisations (HH et HV) donne des résultats comparable à l'imagerie optique et est bien meilleure que l'imagerie radar en bande C et avec une seule polarisation (RADARSAT par exemple). Ce site d'orpaillage est bien répertorié dans la région d'Approuague - Montagne de Kaw comme étant un site d'activité ancien (antérieur à 1994), échelle ~ 1:100 000.



**Fig. 9** Exemple de contrôle d'une concession légale dans la région de Paul Isnard (S1). La comparaison entre l'imagerie satellitaire et la carte des permis montre que la zone exploitée est bien supérieure à celle autorisée (en jaune-rouge).



**Fig. 10** Exemple de contrôle d'une concession légale dans la région de Saül (S2). La comparaison entre l'imagerie satellitaire et la carte des permis montre que la zone exploitée est bien supérieure à celle autorisée (en cyan-bleu).

LANDSAT - 26/09/2002 - RGB=PIR, Rouge, Vert

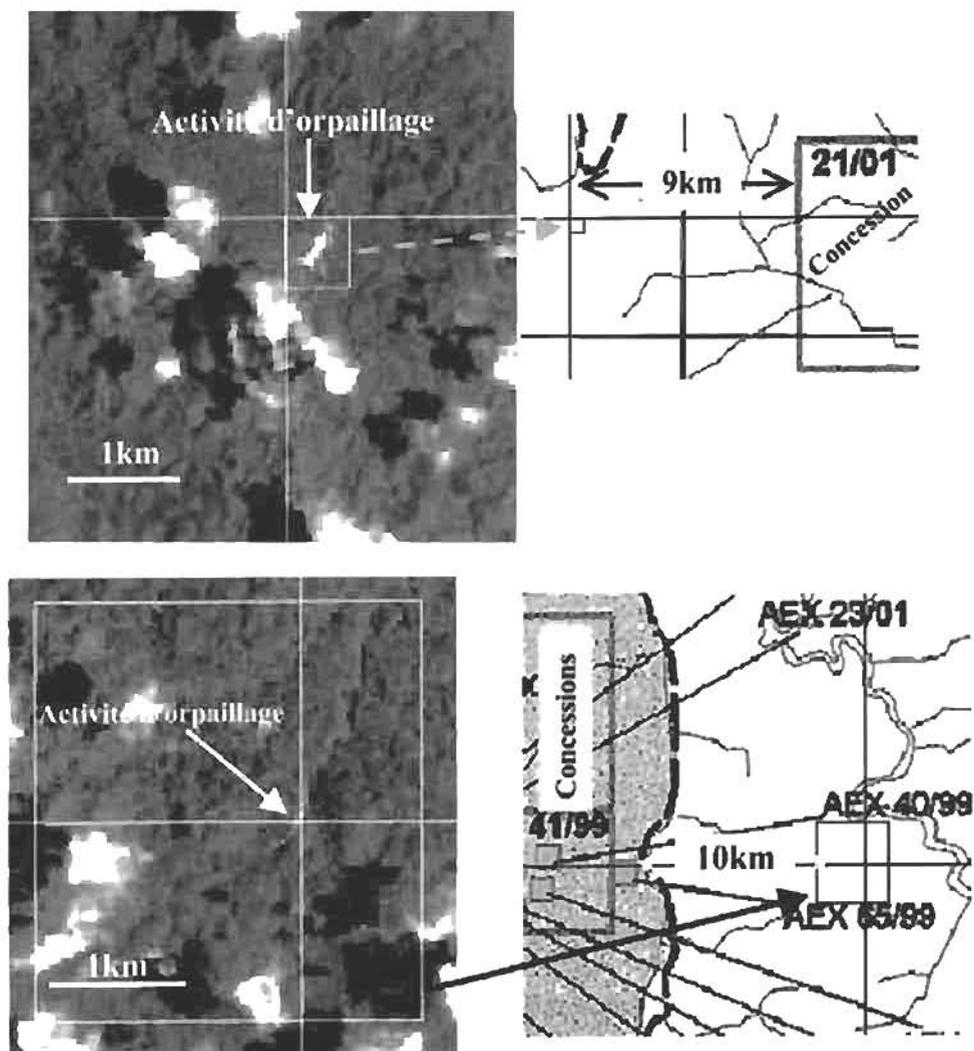


Fig. 11 Comparaison entre les zones d'orpaillage non répertoriées, détectées par LANDSAT, et la carte des permis plus proches dans la région de Paul Isnard (S1). Les deux zones sont à environ 10km des exploitations légales les plus proches.