

**RAPPORT DE CONTRAT DE CONSULTANCE
INSTITUTIONNELLE INDIVIDUELLE OU COLLECTIVE**

**POTENTIEL DE LA TELEDETECTION POUR LA SURVEILLANCE
DE L'ORPAILLAGE**

Rapport final
convention de consultance institutionnelle
IRD-Conseil Régional

Réalisation :
Valéry Gond (CIRAD)
Avec l'appui de :
Michel Petit (IRD)



Unité ESPACE S140
Route de Montabo- BP 165- 97323 Cayenne cedex
Tél : 05-94-29-92-57 Fax : 05-94-31-98-55 Email : gond@cayenne.ird.fr
<http://www.cayenne.ird.fr/laboratoires/teledetection/pres-LRT.htm>

AVANT-PROPOS

Deux contrats de consultance ont été engagés sur le potentiel de la télédétection pour la surveillance de la pêche et de l'orpaillage. Le choix a été fait de présenter l'outil utilisé, à savoir la télédétection, pour les deux contrats en annexe et d'opter pour une trame identique pour les deux thématiques.

Ces contrats ont fait l'objet de sous-traitance. Concernant la pêche, l'IRD travaille avec la société SPOTIMAGE SA, en particulier avec Yves Barthélémy, ingénieur du département Applications et Laure Gardel, ingénieur en accueil au Laboratoire Régional de Télédétection. Concernant l'orpaillage, l'IRD travaille en collaboration avec le CIRAD et précisément avec Valéry GOND, chercheur à l'UMR ECOFOG accueilli au Laboratoire Régional de Télédétection.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
SOMMAIRE.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
 1. INTRODUCTION.....	5
2. INITIATIVES ANALOGUES DANS D'AUTRES REGIONS.....	5
2.1. Surveillance des activités d'orpaillage.....	5
2.2. Initiatives nationales ou internationales.....	5
3. EXPLOITATION DES DONNEES SATELLITE.....	6
3.1. Impact de l'orpaillage.....	6
3.2. caractéristiques des données satellite.....	6
3.2.1. <i>Capteurs utilisés</i>	7
3.2.2. <i>Données SPOT et LANDSAT</i>	7
3.2.3. <i>Autres données</i>	7
3.3. Principe de la méthode utilisée.....	8
3.4. Développement des techniques adaptées.....	8
3.4.1. <i>Traitements de l'image</i>	8
3.4.2. <i>Intégration dans un Système d'Information Géographique</i>	11
3.5. Validation sur le terrain.....	11
4. SURVEILLANCE DU TERRITOIRE GUYANAIS.....	12
4.1. Contexte et besoins.....	12
4.2. Localisation à l'échelle du département.....	12
4.3. Suivi du phénomène dans le temps.....	12
5. DISCUSSION ET PERSPECTIVES PAR RAPPORT AUX ATTENTES DE LA REGION GUYANE.....	13
5.1. Evaluation des potentiels et limites des capteurs.....	13
5.2. Evaluation des potentiels et limites de la méthodologie.....	13
5.2.1. <i>Degré d'automatisation</i>	14
5.2.2. <i>Importance du terrain</i>	14
5.3. La télédétection pour une surveillance opérationnelle.....	14
5.4. Intérêt d'une station de réception.....	14
5.5. Perspectives pour un observatoire régional.....	15
6. BIBLIOGRAPHIE.....	16

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Une zone d'orpaillage en forêt près de Maripasoula.....	6
Figure 2 : Le contraste des réflectances entre canopée et sol nu.....	8
Figure 3 : Détails du module de traitement des images.....	9
Figure 4 : Validation de terrain.....	11
Figure 5 : Suivi du phénomène dans le temps.....	13
Figure 6 : Surveillance de la validité des exploitations.....	15

1. INTRODUCTION

Actuellement la Guyane ne dispose pas d'outils pour localiser et évaluer l'évolution de l'orpaillage notamment illégal, sur son territoire. Les services de l'Etat n'ont accès qu'à des informations partielles et très hétérogènes sur ce qui se passe à l'intérieur du pays. La localisation au sein de la forêt amazonienne reste très problématique du fait de l'isolement dû au manque d'infrastructures d'accès. Afin de mieux organiser l'exploitation de la ressource aurifère il convient de faire un état des lieux de l'exploitation actuelle (légale et illégale) et de mettre en place des outils de surveillance de cette activité minière. Rationaliser cette exploitation permettrait alors de mieux contrôler les fraudes, les rejets polluants mais aussi d'organiser les concessions d'exploitation précisément et enfin de limiter la déforestation dans les milieux très fragiles que sont les lits de rivières (l'exploitation de l'or en Guyane est principalement de type alluvionnaire).

2. INITIATIVES ANALOGUES DANS D'AUTRES REGIONS

2.1. Surveillance des activités d'orpaillage

Peu d'outils ont été développés pour la surveillance de la déforestation liée aux activités d'orpaillage (Almeida-Filho, 2002). Localement ce type de déforestation est néfaste pour l'environnement mais aussi pour les populations locales. On peut toutefois noter que l'intérêt est grand auprès des collectivités locales concernées mais aussi des Organisations Non Gouvernementales (ONG) protectrices de l'environnement.

2.2. Initiatives nationales ou internationales

A notre connaissance il y a peu d'initiatives dans la détection des sites d'orpaillage par imagerie satellitaire (Polidori et al., 2001). Beaucoup de recherches sont menées sur les conditions et les impacts des pollutions sur l'environnement (Grasmick et al., 2001). La surveillance systématique reste peu développée mais intéresse beaucoup de partenaires régionaux. C'est dans ce contexte que le Cirad a eu l'initiative de lancer un projet pour coordonner et diffuser son savoir-faire en la matière (Forest and Remote Sensing Exchanges Network, FORESEEN, Gond, 2003)

3. EXPLOITATION DES DONNEES SATELLITE

3.1. Impacts de l'orpaillage

Les sites d'orpaillage sur lesquels on utilise la technique actuelle de décapage du sol ont une signature spectrale très particulière. En effet le déblayement total des alluvions (jusqu'à une profondeur de 10m) prospectés confère aux implantations une allure totalement déboisée (sur plusieurs kilomètres parfois et sur une largeur de 50 à 150m). Le sol trituré et remanié est alors complètement stérile. Ceci entraîne une grande difficulté pour la re-végétalisation de ces sites (Petersen et Heemskerk, 2001 ; ONF communication personnelle). Ces marques très profondes dans la végétation peuvent être assimilées à des balafres nettement contrastées avec l'environnement non perturbé. (Figure 1)



Figure 1 : une zone d'orpaillage en forêt près de Maripasoula. On distingue nettement les zones de déblais ainsi que la perturbation du cours d'eau. Mars 2003.

En aval de ces sites d'orpaillage les rejets de boues dans la rivière entraînent une forte coloration des cours d'eau. Ce surplus de matière en suspension étouffe complètement le milieu aquatique sur plusieurs kilomètres perturbant le bon fonctionnement écologique des cours d'eau. De plus l'extraction de l'or au moyen de l'amalgame mercure-or entraîne des pollutions chimiques très toxiques.

3.2. Caractéristiques des données satellite

Comme décrit dans l'annexe ci-jointe les données satellites utilisées dans cette étude sont des données aux gammes spectrales visible et infra-rouge. Ces longueurs d'ondes sont indiquées pour analyser les mécanismes fonctionnels de la végétation (activité

chlorophyllienne et état sanitaire principalement). Il s'agit de montrer les potentialités des données actuellement disponibles et accessibles.

3.2.1. Capteurs utilisés

Trois capteurs sur des plate-formes satellitaires différentes sont apparus pertinents pour cette étude. Il s'agit du capteur HRVIR (Haute Résolution Visible et Infra-Rouge) du satellite Spot-4, du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite Landsat 5 et du capteur ETM+ (Enhance Thematic Mapper) du satellite de Landsat 7. Ces trois capteurs peuvent fournir des données dans les longueurs d'ondes adéquates et ont une répétitivité de prise de vue suffisante pour faire un suivi régulier de la surface terrestre (cf annexel). La résolution spatiale de respectivement 20m, 30m et 30m est largement suffisante dans le cadre de l'étude. De meilleures résolutions (5m et 10m) comme sur le satellite Spot-5 sont tout à fait adaptées à la méthode et seraient immédiatement opérationnelles dans le même schéma que celui présenté dans cette étude de faisabilité.

3.2.2. Données SPOT et LANDSAT

Dans notre analyse plusieurs images ont été utilisées pour mettre au point l'algorithme de détection. Il s'agit tout d'abord d'une image Spot 4 du 18 octobre 2001 (KJ 689-339) acquise dans le cadre du programme ISIS du CNES. Le traitement de cette image est de niveau 2B (avec correction radiométrique et géométrique). Des points géographiques ont été collectés sur le terrain par GPS (Ground Positioning System) type Magellan 315 afin de géoréférencer plus précisément l'image. La précision géographique ainsi obtenue est de 10m au sol. Ce qui est largement suffisant dans le cadre de cette étude. La projection a été effectuée en format UTM22N (Universal Transverse Mercator fuseau 22 Nord) dans le référentiel géodésique WGS84 (World Geodetic System de 1984). Les bandes spectrales utilisées ont été le rouge (0.61-0.68 μ m), le proche infra-rouge (0.79-0.89 μ m) et le moyen infra-rouge (1.58-1.75 μ m).

Ensuite une série d'images Landsat 5 et Landsat 7 ont été acquises via le serveur d'image de l'Université du Maryland (USA) GLCF (Global Land Cover Facility). Les données sont toutes corrigées radiométriquement et géométriquement. La projection est identique à celle de l'image Spot, UTM22(WGS84). La précision au sol y est de 15m environ d'après nos estimations. Les bandes spectrales rouge (0.63-0.69 μ m), proche infra-rouge (0.78-0.9 μ m) et Moyen infra-rouge (1.55-1.75 μ m) ont été utilisées. Un jeu de données du 24 juillet 1990 (path and row 227-57) et du 18 octobre 2001 (path and row 227-56 et 227-57) a été analysé.

3.2.3. Autres données

Les tests sur des images radar n'ont pas été effectués dans cette étude mais des travaux précédents en montrent l'efficacité (Almeida-Filho et al., 2003). Il est donc tout à fait envisageable, pour compléter des éventuelles lacunes d'information, d'utiliser ces données lors de couvertures nuageuses persistantes à certaines périodes de l'année.

3.3. Principe de la méthode utilisée

Le principe général de la méthode utilisée est basé sur l'utilisation des contrastes entre l'objet observé et son environnement (Gond et al., 2004). Dans le cas de la présente étude l'objet observé (les sites d'orpaillage) se distingue de son environnement (la forêt tropicale humide) avec un fort contraste (sol mis à nu et végétation environnante) (Figure 2). L'amplification de ce contraste par des méthodes de calcul n'a pour seul but que d'isoler proprement les objets étudiés et ainsi de mieux les identifier. Une fois identifiés ces objets sont extraits des images sous forme de vecteurs. Ces vecteurs peuvent alors alimenter un système expert en données géo-référencées.

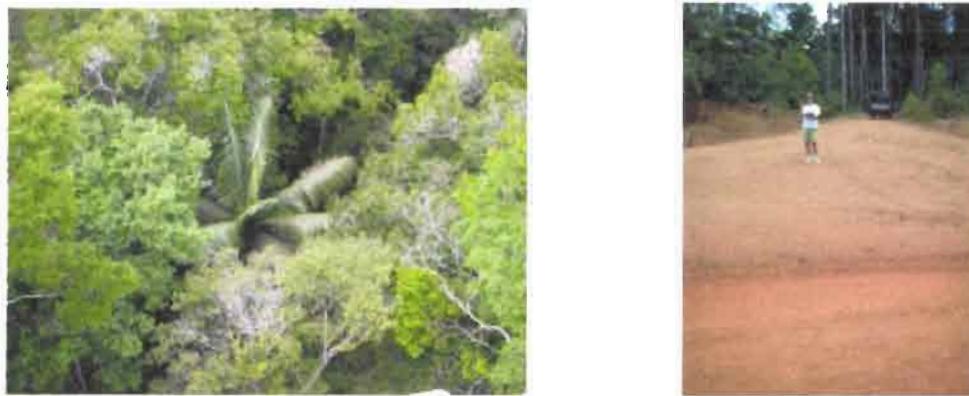


Figure 2 : le contraste des réflectances entre la canopée et le sol nu permet d'identifier les objets particuliers comme les sites d'orpaillage.

3.4. Développement des techniques adaptées

La technique en Guyane a principalement été développée pour repérer les activités humaines au sein d'une forêt tropicale humide (Gond et al., 2003). L'orpaillage n'échappe pas à cette définition et donc un développement particulier a été fait plus spécifiquement pour cette activité.

3.4.1. Traitement de l'image

L'algorithme a été principalement réalisé sur l'image Spot-4 du 18 octobre 2001. Les bandes spectrales visible, proche infra rouge et moyen infra rouge ont été utilisées. Un filtre, afin d'éliminer les nuages, a été mis au point (Colson et al., 2003) pour éviter les confusions possibles. Un filtre similaire a aussi été développé pour les images Landsat (Trébuchon, 2003). Pour toutes ces données il a été nécessaire alors de produire des néo-canaux (combinaison de plusieurs bandes spectrales entre elles) afin de préparer les données à l'algorithme mis au point.

D'une part par la composition d'un indice de végétation (Rouse et al., 1974) :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{VIS})/(\text{PIR}+\text{VIS})$$

Où NDVI est le Normalized Difference Vegetation Index, PIR est la bande spectrale Proche infra-rouge et VIS la bande spectrale rouge des capteurs considérés.

Et d'autre part par la composition d'un indice d'humidité des tissus foliaires (Gao, 1996)

$$\text{NDWI} = (\text{PIR}-\text{MIR})/(\text{PIR}+\text{MIR})$$

Où NDWI est le Normalized Difference Water Index, PIR est la bande spectrale Proche infra-rouge et MIR la bande spectrale Moyen infra-rouge des capteurs considérés.

Ces deux indices combinés avec la bande spectrale Moyen Infra rouge permettent alors de dégager un fort contraste dans les valeurs numériques de l'image satellite (Figure 3-b). Il est alors possible d'établir des seuils afin d'isoler et d'extraire l'information recherchée. Une fois les objets recherchés identifiés une vectorisation est alors faite afin d'extraire l'information (fonction du logiciel de traitement d'image ENVI 3.5). Que ce soit pour Spot ou Landsat ces seuils sont similaires. Seules les valeurs changent légèrement en fonction des largeurs des bandes spectrales propres aux différents capteurs (HRVIR, TM et ETM+).

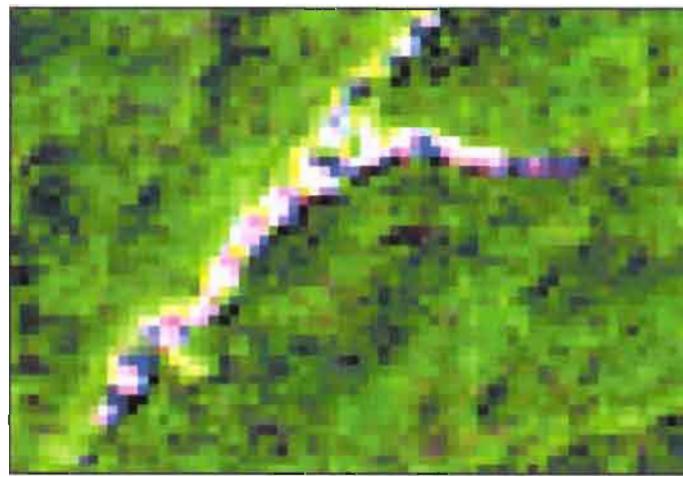


Figure 3-a : la composition colorée d'origine avec le moyen infra-rouge (rouge), le proche infra-rouge (vert) et le rouge (bleu). La zone orpaillée apparaît nettement au sein de la forêt mais peut se confondre avec d'autres objets (inselbergs, savanes, abattis récents).

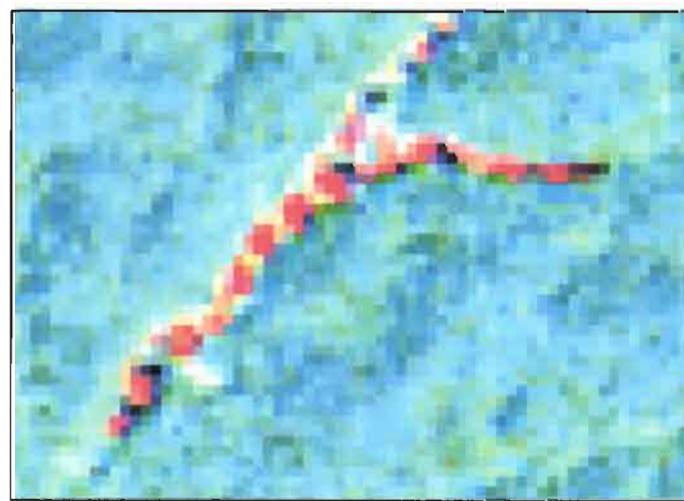


Figure 3-b : la composition colorée est présentée avec les nouveaux canaux NDVI, NDWI et le canal d'origine moyen infra-rouge. Cette configuration permet de mieux cerner les zones orpaillées au sein de la canopée et d'éviter les confusions avec d'autres objets.

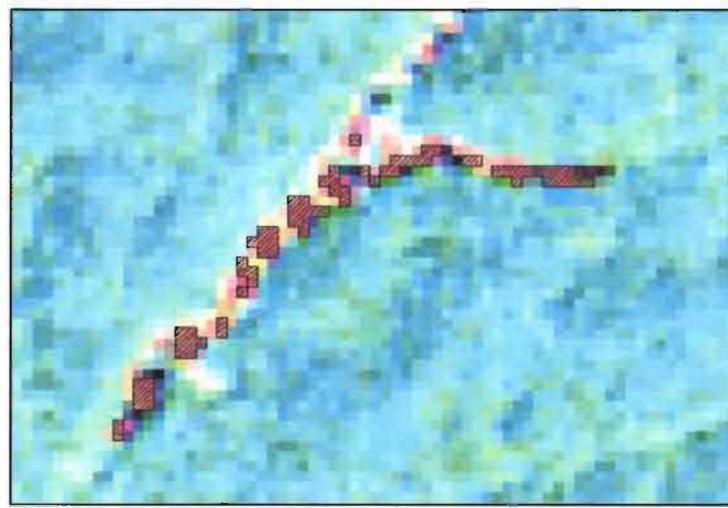


Figure 3-c : le filtre automatique permet alors d'identifier et de cerner les zones typiquement en sol nu. Ce masquage ou vectorisation isole alors de façon sûre la présence de l'orpailage.

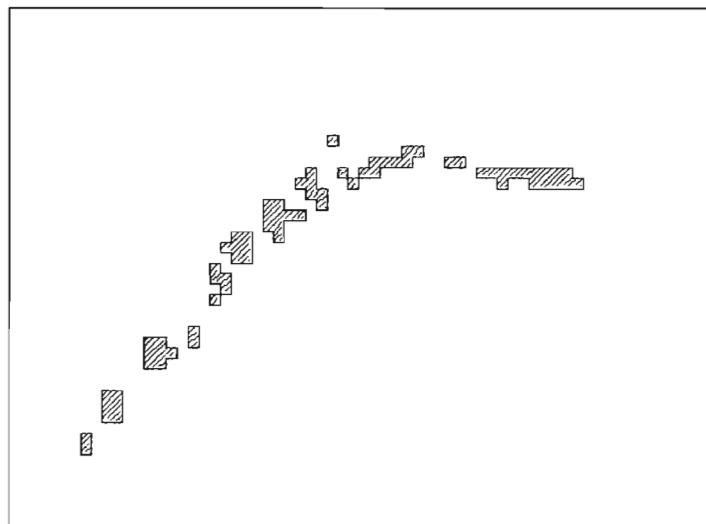


Figure 3-d : finalement on ne garde que le fichier vecteur afin d'utiliser cette donnée dans un système d'information géographique (puisque chaque élément est localisé en longitude latitude en projection d'origine de l'image). Chaque polygone a une taille de 20m comme l'image d'origine.

3.4.2. Intégration dans un Système d'Information Géographique

Ces vecteurs sont les limites des zones orpaillées. Il ne reste donc plus qu'à les insérer dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettant d'évaluer l'ampleur des sites et leur localisation. Ces données peuvent alors mettre à jour des cartes précédentes et contribuer ainsi à la surveillance du territoire. Les formats de fichier (Shapefiles) de sortie sont génériques et utilisables par les principaux logiciels SIG (comme Arc-View 8.3 par exemple).

3.5. Validation sur le terrain

Un site d'orpaillage a été validé. Il s'agit d'un site d'exploitation récemment abandonné sur la crique plomb (est du barrage de Petit Saut). La balafre très visible sur l'image Landsat 7 du 18 octobre 2001, a été localisée (Figure 4-a). Sur le terrain les zones de retenue d'eau et de dépôts de gravats ont été repérés par GPS (Magellan 315) puis contrôlées sur l'image. La bonne correspondance géographique ne laisse aucun doute sur la localisation correcte du site. Quant à la forme, elle est très bien soulignée par le filtre. Il s'agirait maintenant d'aller plus loin et de valider sur plus de sites mais cela demande des moyens très importants.

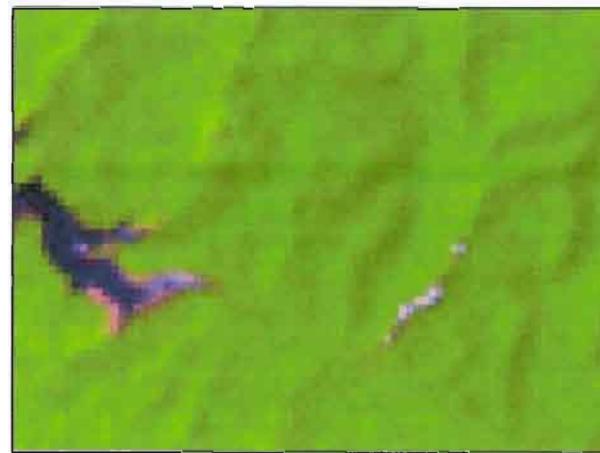


Figure 4-a : sur cette image Landsat apparaît la zone orpaillée à l'Est de la retenue d'eau de Petit-Saut.



Figure 4-b : les zones orpaillées ont facilement été retrouvées sur le terrain. Un pointage GPS a permis de confirmer la position de ce site.

4. SURVEILLANCE DU TERRITOIRE GUYANAIS

4.1. Contexte et besoins

Depuis 1995, suite à la recrudescence de l'activité d'orpaillage liée au développement des techniques et à la hausse du prix de vente de l'or sur le marché international, la Guyane est l'objet d'un enjeu important tant du point de vue économique qu'environnemental. D'un point de vue économique, le développement de la filière aurifère est certes important mais nécessite de lourds investissements qu'engendre la mise en place d'une exploitation (matériel, acheminement, infrastructures). De plus ces activités officielles et légales sont de plus en plus concurrencées par le fort développement des activités illégales. Ces phénomènes spontanés entraînent donc une distorsion du point de vue économique et créent des tensions très vives d'une part entre les exploitants officiels et les exploitants illégaux mais aussi entre exploitants illégaux eux-mêmes. Cette situation est très dommageable pour l'image de ce secteur industriel et est très dangereuse du point de vue social. En effet par définition les exploitations illégales offrent de mauvaises conditions de travail pour les ouvriers. Il est aussi évident que les hommes et les femmes travaillant sur ces sites illégaux sont en très grande majorité des émigrants clandestins (les médias locaux font régulièrement l'échos des actions Anaconda de la Gendarmerie Nationale). Cette situation administrative dans le contexte d'une forêt tropicale humide isolée et avec des conditions de travail difficiles entraîne des conditions de vie très précaires pour ces travailleurs.

Du point de vue environnemental il y a un fort besoin de contrôle des installations afin de limiter les pollutions. La mauvaise utilisation de l'amalgame or-mercure entraîne des pollutions très importantes pour l'environnement des sites mais aussi de toute la chaîne alimentaire autour des cours d'eau. Au sommet de cette chaîne alimentaire les populations riveraines font les frais de cette pollution liée à l'utilisation du mercure. Le taux de mercure retrouvé chez les habitants du haut Maroni par exemple est dramatique et en tous cas hors norme (Carmouze et al., 2001 ; Taubira-Delannon, 2000).

Il y a donc un double besoin de localiser, inventorier et surveiller ces activités dans la forêt guyanaise.

4.2. Localisation à l'échelle du département

Pour cela la télédétection apparaît comme un outil fiable et peu onéreux (en comparaison avec des survols aériens réguliers par exemple) dans la mesure où le territoire à surveiller représente une surface de trois fois celle de la Belgique. Ce territoire ayant peu de moyens de communication (excepté les fleuves et la bande littorale) l'observation depuis l'espace semble promis à un bel avenir pour des missions de surveillance du territoire.

4.3. Suivi du phénomène dans le temps

La télédétection offre la possibilité d'observer dans le temps le développement du phénomène de l'exploitation de l'or. En effet on peut observer un endroit précis pour surveiller l'expansion de l'activité mais aussi on peut grâce à l'archive remonter dans le temps pour voir comment le phénomène s'est développé et ainsi l'analyser, le comprendre et peut être prévoir ce qu'il va devenir. Pour cela les archives SPOT (depuis 1986) et Landsat (depuis 1980) sont pertinentes et permettraient de compléter les analyses de ce phénomène (Figure 5).

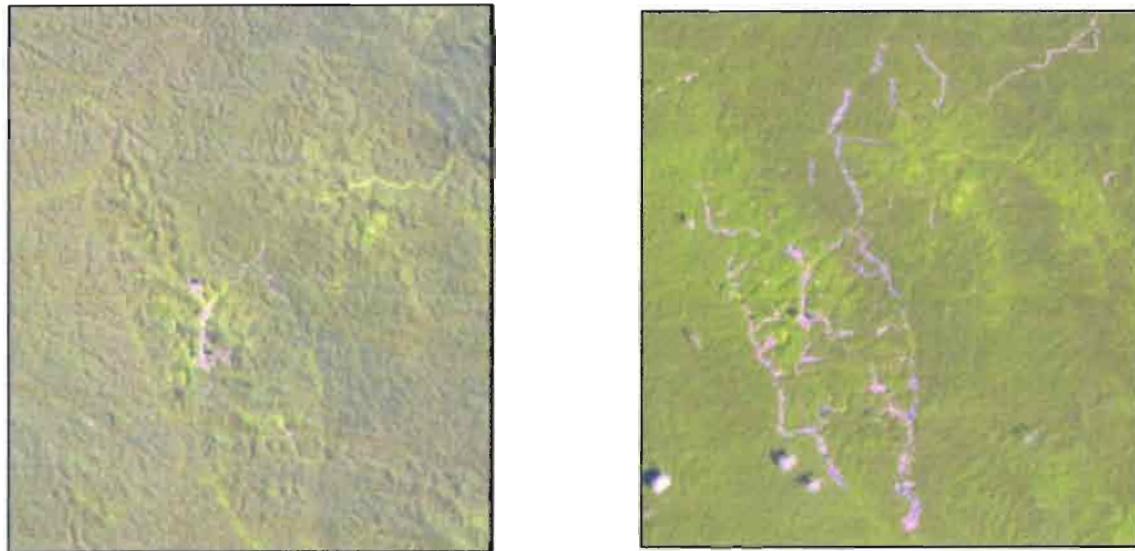


Figure 5 : illustration du développement des activités d'orpaillage sur la commune de St-Elie. A gauche une image Landsat 5 de 1990 et à droite une image Landsat de 2001. On perçoit nettement les zones orpaillées qui ressortent en rose-fushia.

5. DISCUSSION ET PERSPECTIVES PAR RAPPORT AUX ATTENTES DE LA REGION GUYANE

5.1. Evaluation des potentiels et limites des capteurs

Le potentiel de la télédétection dans sa forme actuelle est très important. Les résolutions spectrales des capteurs sont tout à fait suffisantes pour faire du repérage de sites d'orpaillage en contexte forestier tropical. Les limites des capteurs peuvent venir du fait que l'ennuagement peut gêner l'observation durant certaines périodes de l'année (saison des pluies notamment) ou dans certains secteurs (la région Est de la Guyane est plus souvent couverte). Le développement de techniques radar serait un complément très précieux pour faire une détection « tout temps ».

Une limite de cette méthode est la nouvelle technique d'extraction de l'or. Il apparaît de plus en plus que les prospections se font à flanc de colline et sous couvert forestier (ONF communication personnelle). Ceci affectant peu la couverture végétale il sera très difficile de les localiser. Pour cela il faudrait développer d'autres algorithmes capables de détecter le taux de sol nu (trituré en surface) sous couvert si cette technique d'extraction se développe.

5.2. Evaluation des potentiels et limites de la méthodologie

La méthode expérimentale développée dans ce contexte doit encore être affinée dans les mois qui viennent. La position des seuils et la sensibilité des capteurs doivent pouvoir encore être améliorées pour minimiser les confusions avec les pistes forestières ou les savanes

littorales. Toutefois ces milieux sont éloignés des zones orpaillées. Un masquage des zones septentrionales est très facile à mettre en place dans le cadre d'un travail opérationnel.

5.2.1. Degré d'automatisation

Actuellement la méthode a été validée sur un jeu restreint de données Spot et Landsat avec une grande satisfaction. Automatiser la procédure du travail est encore nécessaire afin d'alimenter un Système d'Information Géographique par exemple. Toutefois la rusticité de la méthode augure une bonne robustesse de l'algorithme.

5.2.2. Importance du terrain

La validation de terrain est bien entendu primordiale toutefois la délimitation ne posant que peu de problème un intérêt serait d'orienter les recherches sur le degré d'activité des sites observés. En effet pouvoir évaluer directement si le site est actif ou pas serait très important dans une seconde étape de recherche. Pour cela un travail de terrain serait nécessaire afin de mesurer les spectres sur place des réflectances liées à des degrés d'activités différents (actif, récemment abandonné et anciennement abandonné).

5.3. La télédétection pour une surveillance opérationnelle

Afin de mobiliser peu de moyens humains et matériels la télédétection peut jouer un rôle important. Il suffirait, une fois un inventaire complet réalisé de surveiller régulièrement (on peut imaginer une surveillance tous les 6 mois) les sites actifs et identifier les nouveaux sites. Le complément ainsi réalisé permettrait de se tenir à jour des activités d'orpaillage.

5.4. Intérêt d'une station de réception

L'intérêt d'avoir une station de réception satellite Spot permettrait, cela va de soi, d'aller plus vite et de rendre opérationnel un tel outil de surveillance du territoire. L'immédiateté de l'information est une garantie pour rendre le système de surveillance utile pour le territoire (Figure 6). Les décideurs politiques auront ainsi un outil pour intervenir si cela est nécessaire dans des délais très courts (moins d'une journée). Une telle station de réception serait alors tout à fait capable de fournir des informations en temps-réel pour un système de veille et de mise en alerte couvrant l'ensemble du territoire guyanais.



Figure 6 : Sur cette composition colorée Spot du 18 octobre 2001 a été superposé le vecteur des zones orpaillées (en noir) ainsi que la limite des concessions officielles (en blanc). La concession fait 1km de coté. On remarque qu'aucune activité minière n'est visible dans la concession mais que quatre sites d'orpaillage se situent à la périphérie de celle-ci.

5.5. Perspectives pour un observatoire régional ?

Les actions concrètes d'un tel système d'observation du territoire pourraient être ainsi cataloguées :

- ❖ **Inventaire des sites d'orpaillage.** Faire un état des lieux régulièrement afin de cataloguer les sites d'exploitation de l'or (légaux et illégaux).
- ❖ **Catalogue historique des sites.** Faire l'historique des concessions aurifères sur le territoire permettrait de mieux comprendre les phénomènes de disséminations d'une part mais aussi d'analyser comment la nature reprend ses droits lors de l'abandon des placers.
- ❖ **Outils d'évaluation des pollutions liées à l'activité.** En analysant le degré d'activité, les rejets et en allant sur place, il serait possible d'évaluer l'impact ou l'empreinte écologique de chaque site. Mieux connaître permettrait de mieux contrôler les sources de pollution (turbidité, mercure, rejet divers et matériel abandonné).
- ❖ **Exporter cette technique aux pays riverains.** Il y a un effort à faire pour coordonner nos voisins du plateau des Guyanes qui ont les mêmes problèmes (Brésil, Surinam, Guyana, Colombie et Venezuela). Cela permettrait d'une part de provoquer une coopération régionale pour la surveillance de l'exploitation minière mais aussi renforcerait probablement les actions de police liées aux émigrations clandestines.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Almeida-Filho, R., Shimabukuro, Y., 2002, Digital processing of a Landsat TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon, *Remote Sensing of Environment*, **79** : 42-50.
- Colson, F., Gond, V., Freycon, V., Bogaert, J. And Ceulemans, R., 2003, Detection of treefall gaps using Spot-4 imagery in a tropical rain forest (Counami, French Guiana), *Functional Ecology*, Submitted.
- Gao, B-C, 1996, NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, **58** : 257-266.
- Gond, V., Féau, C. Et Pain-Orcet, M., 2003, Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation, *Bois et Forêts des Tropiques*, **275** : 29-36.
- Gond, V., 2003, Monitoring of the Guyana shield vegetation and human activities impacts with visible remote sensing data, *Monitoring workshop of the Guiana Shield Initiative*, IUCN, May 6-8, Belém (Brésil).
- Gond, V., Bartholomé, E., Ouattara, F., Nonguierma, A., Bado, L., 2004, Surveillance et cartographie des plan d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur Spot 4, *International Journal of Remote Sensing*, **25** : 987-1004.
- 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*, **40** : 167-179.
- Orru, J-F., 2001, Typologie des exploitation aurifères de Guyane et spécificités du contexte socio-économique local. In : Carmouze, J-P.ed – Le mercure en Amazonie, Paris : IRD Editions, pp 425-446.
- Peterson, G. And Heemskerk, M., 2001, Deforestation and forest regeneration following small-scale gold mining in the Amazon: the case of Suriname, *Environmental Conservation*, **28** : 117-126.
- 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 : Carmouze, J-P.ed – Le mercure en Amazonie, Paris : IRD Editions, pp 473-494.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., and Harlan, J., 1974, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD, USA, 371 pages.
- Taubira-Delannon, C., 2000, L'or en Guyane. Eclats et artifices. Rapport, Paris, 139 p.
- Trébuchon, J-F., 2003, Le bouclier oriental Guyanais, cartographie des forêts tropicales humides à l'aide d'images Spot-4 / VEGETATION et Landsat 7 ETM+, DESS de Télédétection du CETEL, Toulouse, 43 pages.

ANNEXE

RAPIDE INTRODUCTION A LA TELEDETECTION

La télédétection utilise les informations issues de capteurs comparables à un appareil photographique à bord de plateformes se déplaçant à distance des objets. Les caractéristiques des informations que l'on peut obtenir dépendent donc de la plate-forme utilisée et de l'instrument de mesure sur la plateforme. L'accès à l'information dépend de la distribution des images.

1 LES PLATEFORMES

Ces plateformes peuvent être des avions ou des satellites.

1.1. Les avions

Les avions peuvent être envoyés à la demande, donc typiquement dans les conditions idéales de capture d'information, mais parcourront des distances restreintes. Le coût sera directement lié au temps de vol. Typiquement en Guyane, pour parcourir de petites zones souvent encombrées de nuages, il peut être plus intéressant (si on a l'instrument de mesure adéquat) de faire appel à un avion plus souple d'utilisation, pour avoir une information.

1.2. Les satellites

Les satellites sont universels, survolent toutes les zones de la Terre sans aucune notion de frontière et quelles que soient les conditions.

Les satellites géostationnaires ou à orbite haute, surtout utilisés en météorologie, restent à 36 000 km au-dessus de l'équateur. Très éloignées, ils « voient » des zones immenses mais assez peu précisément.

Les satellites **défilants polaires**, ou à orbite basse, parcourent la surface du globe de manière régulière (en passant au-dessus des pôles). À environ 800 km de la Terre, ils ont une vision plus restreinte mais avec une précision de plus en plus grande. Quand on parle de précision, on utilise la notion de résolution ou de la taille du plus petit élément observable. Ces satellites sont utilisées pour des études environnementales.

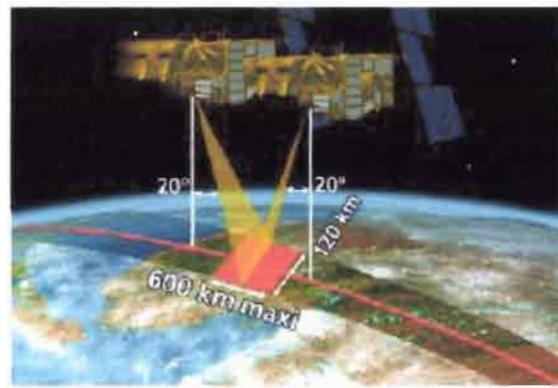


Figure Annexe.1. Les satellites SPOT en rotation autour de la Terre

La vitesse de défilement des satellites polaires est liée au nombre de jours qu'il faut au satellite pour survoler la totalité de la surface de la Terre. L'information intéressant l'utilisateur des images est le temps qu'il lui faut pour « revisiter » un même point du globe (notion de répétitivité ou de revisite).

Les données utilisées dans le cas des deux études sont issues des satellites des constellations LANDSAT, SPOT et ERS, tous des satellites défilants polaires.

2 LES CAPTEURS

Les instruments de mesure à bord du satellite (ou capteur) sont bien évidemment liés aux caractéristiques des images. Ils peuvent être optique ou à hyperfréquence. Un certain nombre de notions sont indispensables pour comprendre les atouts et les limites des données de télédétection.

Les **capteurs optiques** utilisent l'énergie réfléchie par le soleil ou émise par la terre. Tout élément de la Terre va réfléchir cette énergie de façon différente (nuage, forêt, sol nu, mer). Les longueurs d'onde vont du visible à l'infrarouge thermique. Leur principale inconvénient, est l'absence de données de nuit et, surtout en domaine tropical, sous couvert nuageux.

Les **capteurs à hyperfréquences** sont des capteurs dit actifs car ils possèdent leur propre source de rayonnement contrairement aux capteurs optiques. Les longueurs d'onde utilisées sont très grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouge et possèdent donc des propriétés particulières : elles peuvent traverser les couches nuageuses. Cette propriété permet d'acquérir des données quelles que soient les conditions atmosphériques, de jour comme de nuit.

2.1. Les capteurs optiques

2.1.1 Fauchée, résolution, pixel

La fauchée d'une image correspond à la largeur au sol des images. La résolution d'une image est liée à la taille du plus petit objet observable, ou pixel (*picture element* en anglais). La fauchée est assez souvent inversement proportionnelle à la résolution. Par exemple le capteur AVHRR sur le satellite NOAA enregistre des images d'une fauchée de 2 700 km avec

une résolution de l'ordre du kilomètre. Le satellite IKONOS permet d'obtenir des images d'une dizaine de kilomètres avec une résolution métrique.

Il semble évident qu'une résolution de l'ordre du mètre permet de voir plus de petits objets. Mais l'intérêt d'une « grande » fauchée est de pouvoir enregistrer des informations en même temps sur une zone importante (en particulier lorsque les objets que l'on observe évoluent rapidement) et aussi de les comparer plus facilement, les conditions de capture étant différentes d'une image à l'autre. Le choix des données est donc un compromis entre la fauchée et la résolution.

Les satellites SPOT se caractérisent par une fauchée de 60 km sur 60 km. Les capteurs de SPOT 3 et 4 ont des résolutions de 10 mètres en panchromatique (notion expliquée au paragraphe suivant), mais pour la même fauchée, le capteur de SPOT 5 a une résolution de 2,5 mètres. Le satellite IKONOS dont la résolution est plus fine devra passer 6 fois sur une zone pour couvrir la même zone que SPOT 5.

2.1.2 Bandes spectrales

Enfin les capteurs sont caractérisés par des bandes spectrales.

Chaque objet émet des ondes. Par exemple, la végétation aura ce qu'on appelle un spectre différent du sol nu ou de la mer.

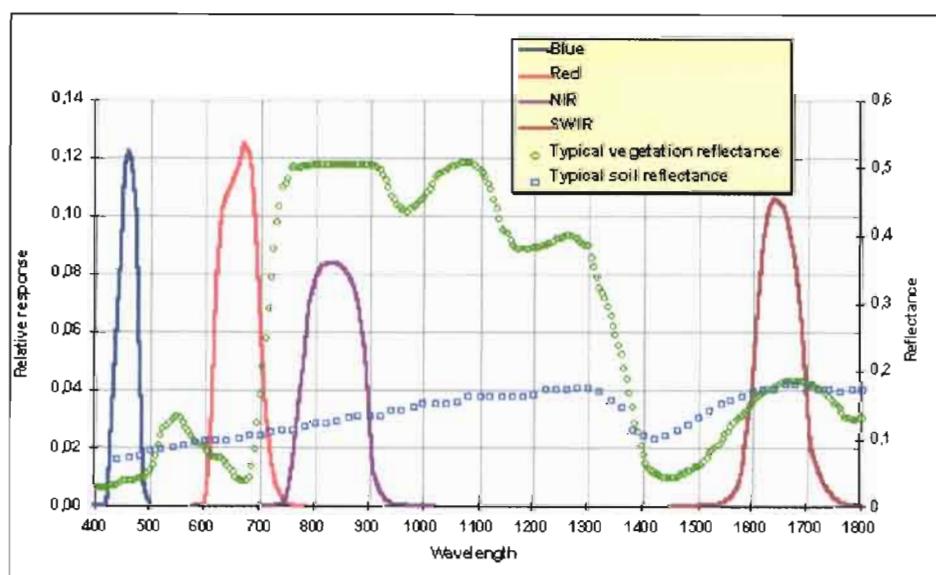


Figure Annexe.2. Spectres de différents éléments : végétation, sol nu

Les objets ne sont donc pas vus de la même manière d'une bande spectrale à l'autre. Ces caractéristiques seront utilisées pour distinguer des objets par rapport à d'autres. Il convient donc de choisir les capteurs avec les bandes spectrales idéales selon les objets que l'on veut observer. L'image est donc la superposition d'images prises avec des capteurs observant le sol dans différentes longueurs d'onde.

Une combinaison judicieuse de ces bandes permet une fine détection des sols partiellement défrichés et pourra être utilisée pour la détection de sites d'orpaillage.

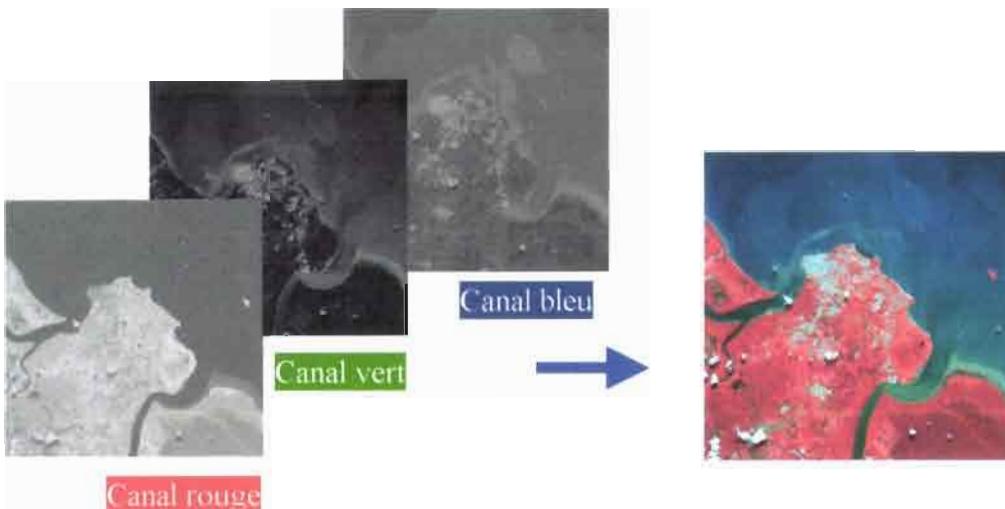


Figure Annexe 3. Bandes spectrales sur une image SPOT .

Sur les satellites SPOT, le capteur fonctionne selon deux modes le mode panchromatique et le mode multi-bande. Le mode panchromatique comprend une seule bande spectrale (dans le visible) mais avec une résolution plus fine (10 m pour SPOT 3 et 4, et 2,5 m pour SPOT 5). Le mode multi-bande comprend 3 bandes spectrales (jaune-vert, rouge et proche infrarouge) dans une résolution moindre.

L’application pour la pêche de la télédétection ne s’intéresse pas à l’information dans les différentes bandes spectrales d’un bateau, mais plutôt à la résolution de l’image. En mode panchromatique le bateau sera un point lumineux sur la mer qui apparaît noire.

2.3. Les capteurs à hyperfréquences ou radar

Le radar éclaire artificiellement les objets au sol et va mesurer l’énergie qui est renvoyée par ces derniers. La quantité d’énergie diffusée dépend des propriétés de la surface (nature du milieu, rugosité, humidité) et de l’angle de contact des ondes avec la cible.

La détection d’un objet dépend :

- de la nature de cet objet (matériau),
- de la taille de cet objet,
- de son orientation rapport au capteur, orienté perpendiculairement au capteur, il renverra un signal plus fort qu’orienté parallèlement.
- de l’angle de prise de vue,
- de l’environnement de l’objet (s’il est uniforme ou non).

3 DESCRIPTION DES CAPTEURS UTILISES

Les images utilisées pour les deux thématiques de surveillance sont issues des satellites LANDSAT, SPOT et ERS. Les caractéristiques au regard des paragraphes suivants sont décrites dans le tableau suivant.

	Envisat	ERS	LANDSAT	RADARSAT	SPOT
PLATEFORME	Satellite en activité	SAR Envisat	ERS2	LANDSAT 7 <i>en réparation en ce moment</i>	SPOT 3, 4 SPOT 5
	Le tour de la Terre réalisé en			99 minutes	101 minutes
	Le satellite passe au-dessus d'un même point tous les (notion de répétitivité)	35 jours		16 jours	26 jours à l'équateur une même région peut être vue 7 fois dans un cycle de 26 jours (11 fois à la latitude 45°)
CAPTEUR	Capteur	Instrument radar	Instrument radar	Instrument optique	Instrument optique
	Largeur des images	100 km		180 x 180 km 50x50km 100x100km	60 km x 60 km
	Résolution	30 m	30 m	30 m en multispectral (6 bandes) 15 m en panchromatique	10 m 30 m SPOT 3, 4 20 m et 10 m en panchromatique SPOT 5 10m et 2,5 mètres en panchromatique
	Bandes spectrales	En bande C	Bande C	8 visible, proche et moyen infrarouge infrarouge thermique	4 visible et proche infrarouge

Tableau Annexe.1. Caractéristiques de différents satellites.

Gond V., Petit Michel (collab.). (2004)

Potentiel de la télédétection pour la surveillance de l'orpailage : rapport final convention de consultance institutionnelle IRD-Conseil Régional

Cayenne : IRD, 16 p. multigr. + 5 p. d'annexes multigr.