

# TELEDETECTION AEROSPATIALE ET RADIOMETRES DE SECONDE GENERATION : DEVELOPPEMENTS NOUVEAUX EN GEOLOGIE APPLIQUEE.

*Exemples en France, Nouvelle  
Calédonie, Guinée, Soudan,  
Gabon et Bolivie<sup>1</sup>*

par

Jean-Yves SCANVIC<sup>2</sup>

## RESUME

Les satellites de ressources terrestres de la première génération, LANDSAT 1, 2 et 3 ont permis de découvrir la télédétection et son potentiel d'utilisation en Sciences de la Terre. Toutefois, au-delà de la cartographie géologique de reconnaissance, le développement des applications n'a pas été celui que l'on attendait car les limites de la technique ont été atteintes.

Depuis 1984, les radiomètres embarqués sur les satellites dits de seconde génération, LANDSAT TM et HRV de SPOT, ou aéroportés, sont à l'origine d'un changement, et l'on constate une augmentation de l'utilisation de la télédétection en géologie appliquée.

Les exemples présentés reflètent cette évolution dans des domaines variés d'applications : cartographie lithologique et structurale appliquée à la recherche minière, et à l'approvisionnement en eau, étude de certains risques naturels. Ils ont été choisis pour leur représentativité de contextes morpho-climatiques variés : aride ou semi-aride, sahélien, tempéré et équatorial et sont fondés sur l'utilisation de données aérospatiales représentatives des différentes gammes spectrales accessibles par télédétection.

Chacun des exemples illustre l'importance qu'il faut attacher à la sélection interactive du traitement nu-

mérique de l'image et la primauté encore actuelle de l'interprétation "analogique" sur l'interprétation automatique.

Une courte réflexion est abordée en conclusion sur la nécessité d'améliorer les classifications automatiques sous la contrainte de l'évolution de la cartographie.

## ABSTRACT

The first generation earth resources satellites Landsat 1, 2 and 3 revealed the potential of remote sensing for utilisation in the Earth Sciences. Nevertheless, apart from reconnaissance geological mapping, the applications of the technique did not develop as had been hoped, because its limits had been reached.

Since 1984, radiometers carried by second-generation satellites, Landsat TM and Spot HRV, and airborne radiometers have brought about a change, and an increase can be seen in the use of remote sensing in applied geology.

The examples given in this paper reflect this evolution in a variety of fields : lithologic and structural mapping in mineral exploration, water supply and certain natural hazards. They have been selected for their representativity of a variety of morpho-climatic settings - desert to demi-desert, steppe, temperate and equatorial - and are based on the utilisation of space data representative of different spectral ranges accessible by remote sensing.

Each of the examples illustrates the importance of the interactive selection of the digital processing of the image and the continuing primacy of analogic interpretation over automatic interpretation.

In conclusion, brief consideration is given to the need for improvement of automatic classification to keep up with advances in mapping.

<sup>1</sup> Communication présentée le 7 juin 1989 au 3ème Symposium sur la Télédétection à Tervuren.

<sup>2</sup> B.R.G.M. - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, B.P. 6009 - F-45060 Orléans Cedex 02.

## MOTS CLES

téledétection multispectrale, radar, prospection minière, hydrogéologie, risques.

## KEY WORDS

multispectral remote sensing, radar, mineral exploration, hydrogeology, risks.

## 1. INTRODUCTION

Les satellites de ressources terrestres de la première génération, LANDSAT 1, 2 et 3 ont permis l'apprentissage de la télédétection numérique et son potentiel d'utilisation en sciences de la Terre. Toutefois, au-delà de la cartographie géologique et structurale de reconnaissance le développement des applications n'a pas été celui que l'on attendait car les limites de la technique ont été atteintes. En particulier, le pouvoir de résolution de ces radiomètres ne permettant pas de localiser au sol avec une précision conforme aux besoins exprimés en géologie appliquée, les observations faites sur les données spatiales, s'est avéré un handicap pour que les cartes de linéaments, apport reconnu de la télédétection, soient transformées en cartes structurales utilisables à cet effet.

Depuis 1984, les radiomètres embarqués sur les satellites dits de seconde génération, LANDSAT TM et HRV de SPOT, ou aéroportés, sont à l'origine d'un changement. L'évolution est sensible et l'on constate une augmentation de l'utilisation de la télédétection en géologie appliquée, avec des succès intéressants toutes les fois qu'elle est intégrée correctement dans la suite logique des démarches et méthodes mises en oeuvre pour aboutir au résultat.

Les cas d'étude présentés reflètent cette évolution par la variété des applications qu'ils représentent : cartographie lithologique et structurale appliquée à la recherche minière, et à l'approvisionnement en eau, étude de certains risques naturels. Situées en France continentale et d'Outre-Mer, en Guinée, au Soudan, au Gabon et en Bolivie, ces études ont été choisies pour leur représentativité de contextes morpho-climatiques variés : aride ou semi-aride, sahélien, tempéré et équatorial. Elles sont fondées sur l'utilisation de données aérospatiales obtenues dans les différentes gammes spectrales accessibles par télédétection, visible, infrarouge, micro-ondes.

## 2. TELEDETECTION ET PROSPECTION MINIERE

En phase de prospection minière il est courant d'utiliser les photographies aériennes qui ont généralement un bon pouvoir de résolution. Leur interprétation s'appuyant sur la perception du relief permet de restituer bon nombre d'informations lithologiques et structurales orientant les levers sur le terrain ou les complétant.

Les données de télédétection recueillies par les satellites de la première génération, Landsat 1, 2 et 3 ont été utilisées jusqu'à présent pour faire l'inventaire des grandes structures tectoniques dans une perspective statistique et linéamentariste. Dans des cas favorables, exposition et taille compatible avec la résolution de 80 mètres des données spectrales, il a été possible de mettre en évidence gossans et chapeau de fer. Enfin, les structures circulaires se sont avérées être un guide intéressant de prospection parce que souvent associées à la forme caractéristique de certains métallotectes.

Actuellement, les satellites de la seconde génération, plus performants au plan de la résolution spatiale et spectrale allient les possibilités de la photographie aérienne avec celles de la télédétection multispectrale numérique, en particulier celles du traitement. Elles permettent d'accéder selon les cas à différentes réponses de type métallogénique concernant les métallotectes lithologiques et structuraux, les altérations, les stress induits dans la végétation.

Ainsi, dans le cadre de l'inventaire minier de la partie orientale de l'île de Nouvelle Calédonie, une étude par télédétection a été réalisée avec les données recueillies par le satellite Spot (Scanvic, 1988).

Il s'agissait, à la lumière de l'interprétation visuelle des images Spot restituées à l'échelle 1:100 000, de faire dans les différents contextes lithologiques de la Nouvelle-Calédonie orientale un inventaire de la fracturation potentielle et des filons associés dans le but d'apporter des éléments nouveaux de réflexion métallogénique. Il s'agissait aussi de mettre en évidence des différenciations spectrales potentiellement induites par la présence en surface de zones minéralisées en nickel ou par le degré d'altération du métallotecte, la nappe des péridotites.

On a privilégié, pour cette étude l'interprétation visuelle car, jusqu'à présent les résultats auxquels elle aboutit, sont généralement supérieurs à ceux de l'interprétation automatique qui, en moyenne permet seulement d'extraire 50 à 60 pour cent de l'information structurale recherchée, et à ceux des classifications spectrales.

Les données Spot acquises sont de type XS de niveau 1B. Ce niveau de produit comprend seulement les corrections géométriques et les corrections radiométriques liées aux déformations systématiques introduites par le système. A partir des données numériques, on a réalisé la mise en conformité des images avec les cartes topographiques correspondantes. Cette mise en conformité est fondée sur la recherche de points de référence, les amers, communs aux différents documents, qui permettent de calculer un modèle de déformation. La qualité photogrammétrique du document corrigé est fonction de la précision des cartes de référence et de l'importance des reliefs : la précision est de l'ordre de 2 pixels (40 mètres).

Les traitements d'amélioration sont à la base des processus mis en oeuvre pour l'utilisation des données de télédétection dans les domaines de la géologie appliquée. Ils sont choisis de façon interactive

avant d'être visualisés. Plusieurs types de traitement d'amélioration ont été réalisés systématiquement sur les données Spot couvrant la partie orientale de l'île, au moyen du système interactif B.R.G.M. en particulier "stretching" et composition colorée également. Sur la zone du prospect aurifère de Koum un traitement spécial de type stretching sinusoïdal a été appliqué sur les données correspondantes.

L'interprétation des données Spot est calée sur les levés géologiques à l'échelle 1:200 000 (Paris, 1981). Seuls les faciès caractéristiques ont été retenus.

Cette interprétation restitue les grands traits de la structure actuelle tout en apportant des précisions sur le bâti néocalédonien car la zone d'étude recouvre à des degrés divers d'importance les entités structurales sous-jacentes à la nappe des péridotites qui domine dans la région. Il s'agit d'un inventaire de premier ordre, non orienté vers un objectif minier précis et localisé. Son contrôle par le seul moyen de la carte géologique montre que certaines discontinuités, limites et faciès se superposent correctement tant en direction qu'en localisation avec des éléments connus ; il permet ainsi de valider certaines des discontinuités nouvelles déduites de l'interprétation, voir de critiquer certaines autres en tant qu'objet géologique.

Pour être totalement efficace, il faut ensuite procéder à une analyse multicritères et à un retour à l'image aboutissant à une interprétation plus fine de deuxième ordre centrée sur des zones sélectionnées. Dans le cadre de cette étude, cette démarche a été ébauchée sur la région orientale de l'île où existent de nombreuses exploitations de nickel, et sur le prospect aurifère de Koum.

\* En bordure de l'océan, à l'ouest et à l'est de Thio la nappe des péridotites forme une bande continue différenciée par les produits d'altération qui lui sont associés. Dans cette région, elle est peu affectée par la tectonique cassante. Les principaux accidents observés sur l'image Spot ont une orientation nord-ouest sud-est (nord 110°) classique de la Nouvelle-Calédonie. Ce sont en général des failles ayant joué en décrochement (Scanvic, 1987 ; Brosse *et al.*, 1987).

A partir de l'analyse spectrale de l'image Spot, il est possible de détailler cet ensemble dans une perspective minière. On distingue en extrapolant les observations faites tant au sol que sur les données de simulation Spot (Lajoinie et Weecksteen, 1985) les sous-ensembles suivants (fig. 1a) :

un faciès de teinte blanche, auquel sont associés tous les gisements connus d'oxydes de nickel ;

un faciès de teinte rouge vif, occupant des surfaces caractérisées en général par un couvert végétal assez développé, sur péridotites saines ou peu altérées prédominantes. Ce faciès a été délimité lorsqu'il correspond à des zones homogènes sur des superficies d'extension no-

table, et il correspond alors à des zones d'intérêt minier très faible ;

un faciès de teinte verdâtre, occupant des superficies moins grandes. Il se rapporte à des ensembles morphologiques de pente relativement faible sur les versants ou sur les larges crêtes, auxquels sont associés diverses altérites dont l'intérêt minier est reconnu ;

un faciès de teinte vert foncé, occupant des surfaces importantes. Il se rapporte à un ensemble morphologique, celui des versants de forte pente. Ils sont pour l'essentiel des versants rocheux inclus dans l'unité des péridotites saines où la possibilité de découvrir des cibles minières importantes est faible.

Compte tenu du contexte, ces informations spectrales peuvent être classées automatiquement et l'analyse de correspondance teneur en nickel, valeur de réflectance, là où elle a pu être faite, est bonne (fig. 1).

\* Sur le permis aurifère de Koum dont la géologie est connue, on a aussi effectué une interprétation de second ordre, sur une sortie photographique personnalisée au cours d'une séance interactive réalisée avec le concours du géologue assurant la prospection. On a pu mettre ainsi au point une visualisation particulière de type "stretching sinusoïdal" qui apporte la meilleure information. Ce traitement a été restitué sur un film permettant un agrandissement à l'échelle 1:50 000 dans des conditions optimales.

L'interprétation (fig. 2) met en évidence différents faciès résultant de 3 facteurs, ou de leur combinaison : nature de la roche ou des altérites, végétation, ombres et/ou topographie associée.

Le faciès blanc, dont on sait qu'il est associé aux oxydes de nickel, est présent en plusieurs endroits où l'existence d'exploitations n'est pas signalée. Le stretching sinusoïdal le traduit fortement ainsi que ses variations.

Le faciès verdâtre, reflet de certaines altérites dont l'intérêt minier est reconnu, occupe des surfaces de moyennes extensions.

Le faciès rouge, reflet de roches saines couvertes de végétation, est peu représenté. Il souligne aussi les affleurements de granite de Koum dont la distinction des péridotites, est renforcée par le stretching sinusoïdal.

Le faciès vert, reflet lui aussi de roches saines plus fortement pentées, occupe d'importantes surfaces. Le stretching sinusoïdal sépare ce faciès en deux sous-faciès, dont l'un correspond à des altérites.

Le filon de Koum a une réponse spectrale composite ; il est souligné par la fracturation qui l'accompagne, élément structural marquant de la région, et par des petites zones spectralement disparates (blanches, bleues, violettes) alignées au long de son tracé (fig. 3).

Ainsi, le traitement numérique et l'interprétation des images Spot apportent des informations de nature structurale et spectrale qui contribuent uti-

lement à la connaissance géologique de la partie orientale de la Nouvelle-Calédonie. En effet, à

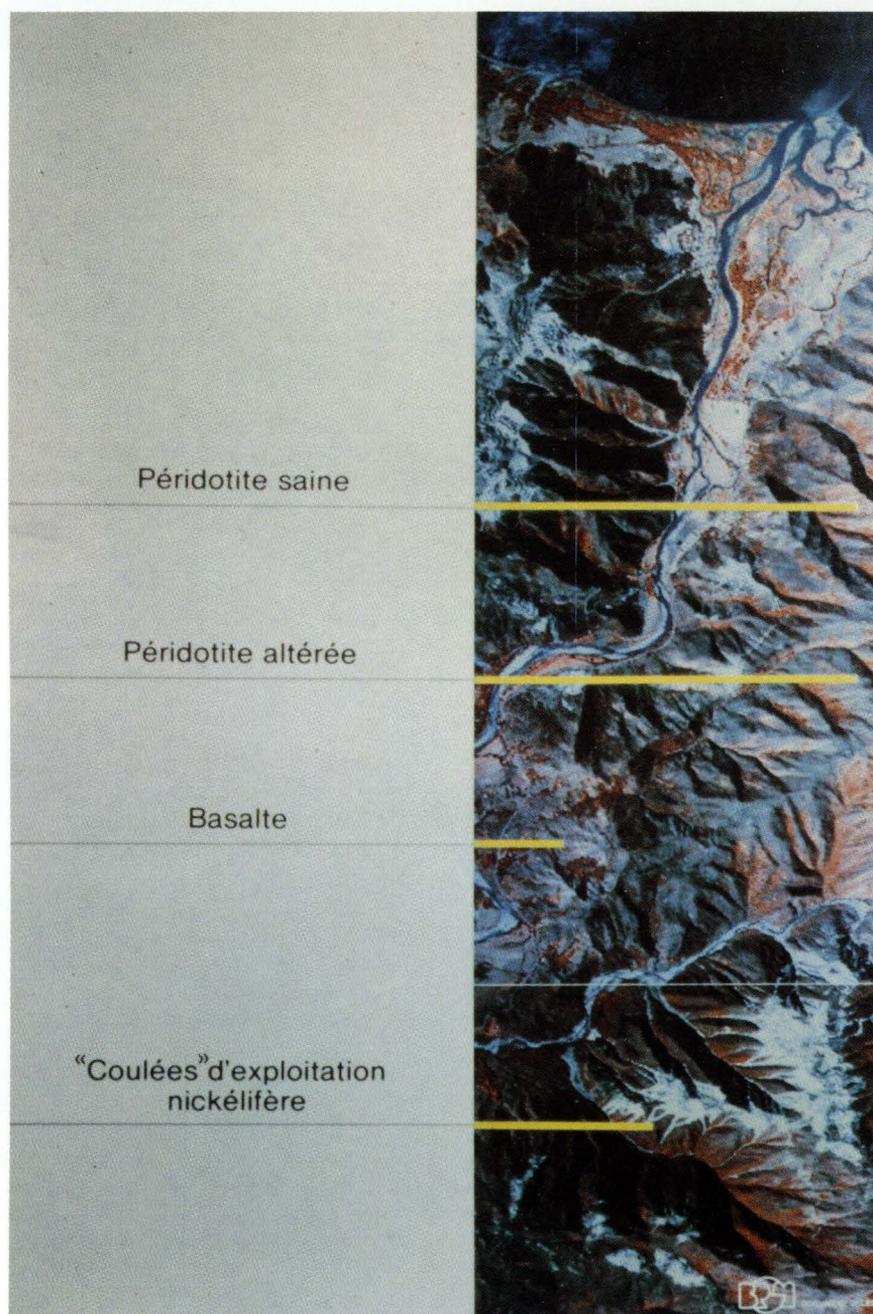


Figure 1a : Correspondance lithologie-réponse spectrale d'après Lajoinie et Weecksteen, 1985.

toutes les échelles de la recherche minière, l'accent est mis sur l'intérêt de détailler l'analyse structurale et l'interprétation des données de télédétection permet de réaliser à moindre coût un inventaire des accidents qui représentent un bon support pour orienter sur le terrain les mesures nécessaires. Télédétection et mesures in situ permettront d'améliorer la compréhension et la prévision des concentrations minérales à l'échelle régionale.

Les réponses spectrales restituées par les images Spot fournissent aussi une information plus spécifiquement et directement minière. Il s'agit des réponses induites par les différentes altérations dont l'intérêt minier est connue, en particulier celles qui sont directement associées aux exploitations de nickel. Elles sont accessibles dans certaines conditions d'affleurement et à partir de parcelles d'en-tînement connues sur le terrain. Elles induisent des différences suffisamment sensibles pour per-



Figure 3. : Le granite de Koum (Nouvelle-Calédonie) image colorée d'un "stretching sinusoïdal".

mettre de délimiter les faciès les plus prometteurs à condition d'opérer sur des cibles bien délimitées, pour poursuivre l'analyse de premier ordre, structurale et spectrale, par une analyse supervisée de second ordre plus détaillée et étayée par des traitements locaux optimisés.

### 3. TELEDETECTION ET RESSOURCES EN EAU

La reconnaissance des aquifères souterrains nécessite d'acquérir une bonne connaissance de leur

lithologie et des éléments structuraux qui conditionnent leur forme et dans certains cas leur alimentation. C'est à partir de là que sont localisés les travaux plus détaillés de géophysique et sont ensuite implantés les forages.

Les compléments cartographiques, lorsqu'ils sont nécessaires, et l'inventaire de la fracturation dans la plupart des cas, sont actuellement réalisés à partir de données de télédétection et une analyse

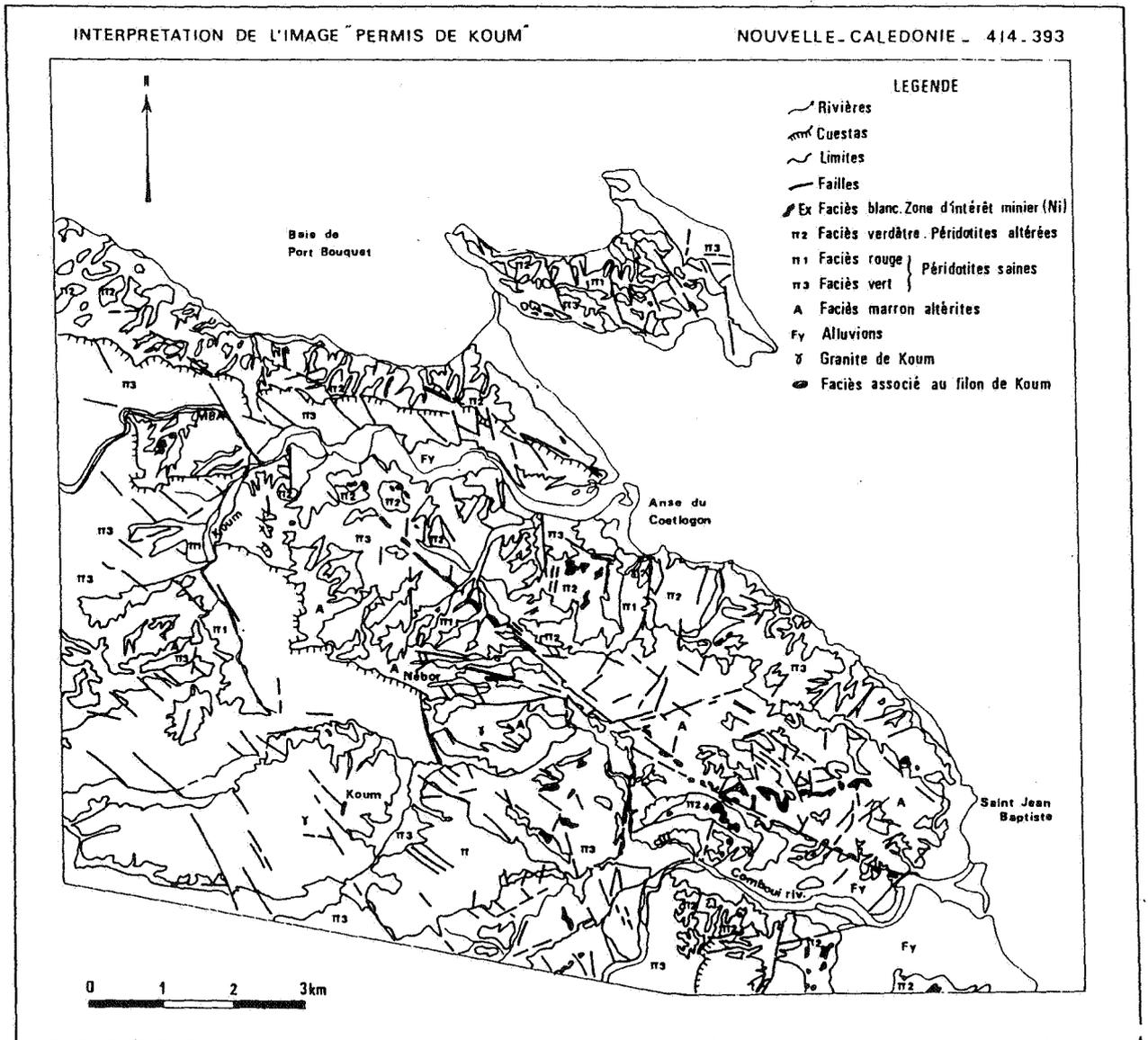


Figure 2 : Interprétation de l'image "permis de Koum" Nouvelle Calédonie.

Figure 1b : Analyse des correspondances valeur radiométrique - Teneur Ni moyenne d'après Lajoinie et Weecksteen, 1985.

N° du graphique	Désignation des sites miniers	Valeurs radiométriques extrêmes		Teneurs Ni moyennes % (minerai exploité ou stocké)	Observations
		C1	C2		
1	Vieille mine Moulinet	30-40	60-80	0,8-1	gradins rocheux "sec" nombreux talus susceptibles d'abaisser la radiométries
2	Décharge St Martin	50-60	110-110	1,2-1,4	latérite ; radiométrie homogène
3	Décharge Wellington	60-70	100-120	1,3	2 niveaux de radiométrie ; le plus faible (50-60 pour C2) correspond aux talus
4	Plate-forme mine Moulinet	30-50 55-65	60-80 100-120	2,0	les faibles valeurs radiométriques correspondent à la roche non minéralisée. Elles n'ont pas été retenues.
5	La Recherche		100-125	2,45	
6	Gironde		90-100	2,5	
7	Bornet 1	70-90	140-180	2,6	
8	Minerai "bloqué" au N de la décharge St Martin	60-80	120-140	2,8	
9	L'Espérance	80-100	170-190	3	
10	Stock de garniérite (rivière Nakale)	30-40	110-120	3	
11	Elise		130-160	3,1	
12	Etoile		120-150	3,2	
13	Aurore		120-150	3,2	
14	Mariette	90-100	160-180	3,3	
15	Effie Mickle	80-100	170-190	3,3	

structurale in situ : les premières fournissent la trame tectonique régionale, la seconde débouche sur une vision dynamique des accidents. Avant le lancement de Spot seules quelques rares études avaient été réalisées à partir des données MSS Landsat car leur résolution spatiale ne permettait pas de localiser au sol, avec une précision suffisante, les phénomènes observés sur les images.

Depuis que les données Spot à haute résolution sont disponibles ou programmables, leur utilisation pour la recherche des sites d'implantation de forage pour la mise en évidence de ressources en eau passe, grâce aux bons résultats obtenus jusqu'alors de l'exceptionnel ou systématique. L'exemple de Kamsar (Guinée) est une bonne illustration de la réussite d'une méthodologie intégrant fortement l'utilisation des données Spot numérique dans un programme d'aménagement concerté d'une région en cours de développement (Scanvic, 1987 ; Brosse *et al.*, 1987). A l'origine il y a la découverte d'un gisement de matières premières et sa mise en ex-

ploitation induisant la création d'aménagements, voie de communication, installations portuaires, alimentation en eau potable des populations.

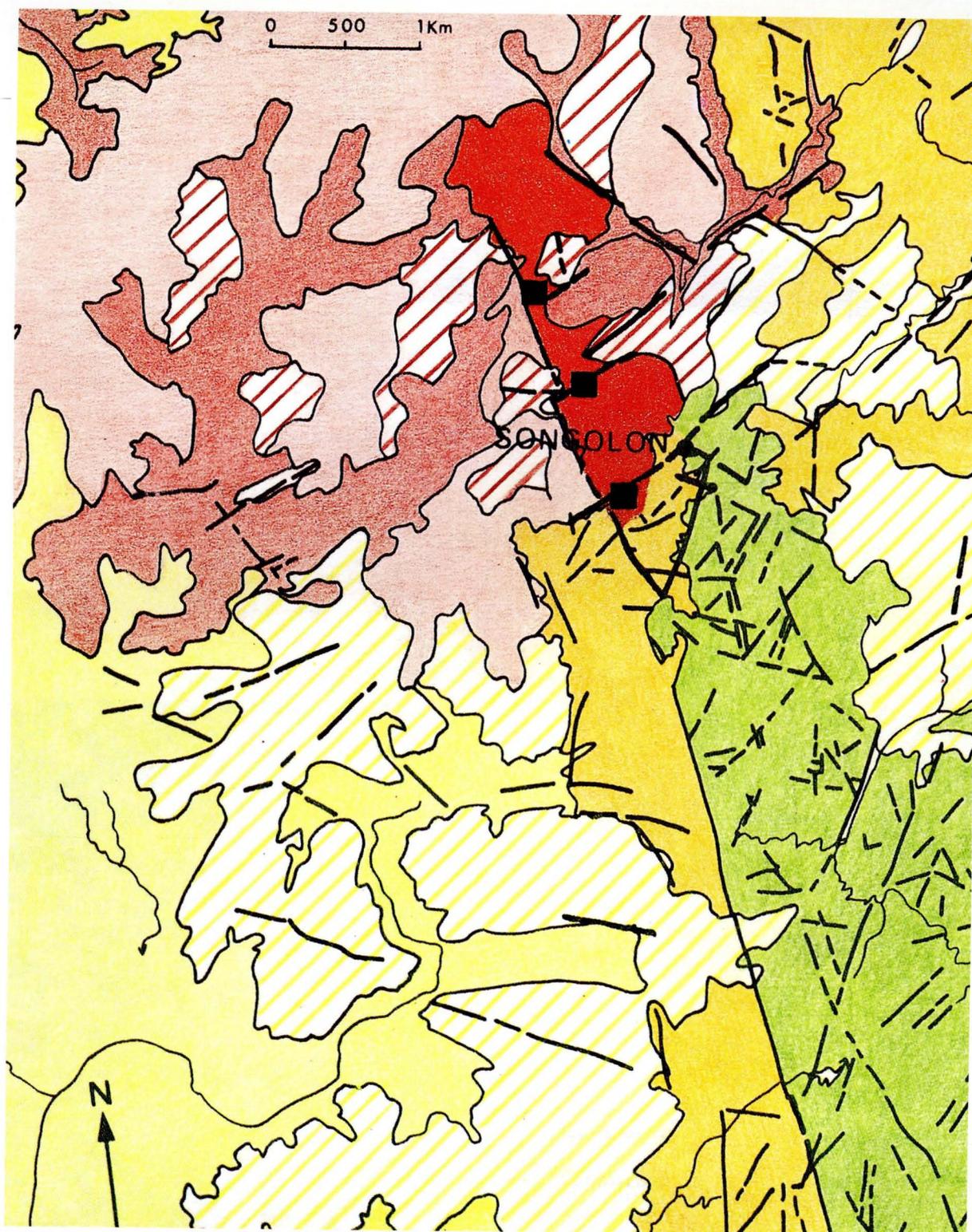
Les travaux nécessités par l'exploitation de la mine de Boké ont conduit la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG) à confier au B.R.G.M. certaines des opérations nécessaires. Plusieurs techniques ont été mises en oeuvre, dont la télédétection. Les données numériques Spot restituées sous différentes formes photographiques, composition colorée, étalement de type sinusoïdal, permettent d'acquérir des informations, reproduites avec l'accord de CBG dans trois domaines.

\* Sur le gisement de Bauxite où les observations concernent :

- la planimétrie : limites de l'exploitation, pistes et voies de chemin de fer, réseau hydrographique, végétation, dont la connaissance est nécessaire au niveau des études d'impact ;

- la lithologie : le bassin bauxitique est bien individualisé par rapport à son environnement

latéritique ; des différenciations apparaissent qui se corrént assez bien avec les pages de



- 1<sup>er</sup> priorité d'exploration  
1<sup>st</sup> exploration priority
- 2<sup>er</sup> priorité d'exploration  
2<sup>nd</sup> exploration priority
- 3<sup>er</sup> priorité d'exploration  
3<sup>rd</sup> exploration priority
- 4<sup>er</sup> priorité d'exploration  
4<sup>th</sup> exploration priority

- Boreholes sited as a result of the studies  
Pozos excavados tras haber efectuado los estudios
- Zone à risque de salinité  
Zone with possible risk of salinity  
Zona con riesgos de salinidad
- Grès alimentant l'aquifère de Songolon  
Sandstone recharging the Songolon aquifer  
Areniscas que alimentan el acuífero de Songolon
- Zone de schistes à faible perméabilité  
Zone of low permeability shale  
Zona de esquistos de baja permeabilidad
- Formations superficielles de faible épaisseur sans intérêt hydrogéologique  
Thin surficial deposits of no hydrogeological interest  
Formaciones superficiales de poco espesor sin interes hidrogeologico

Figure 4 : République de Guinée. Carte d'orientation des recherches en eau.

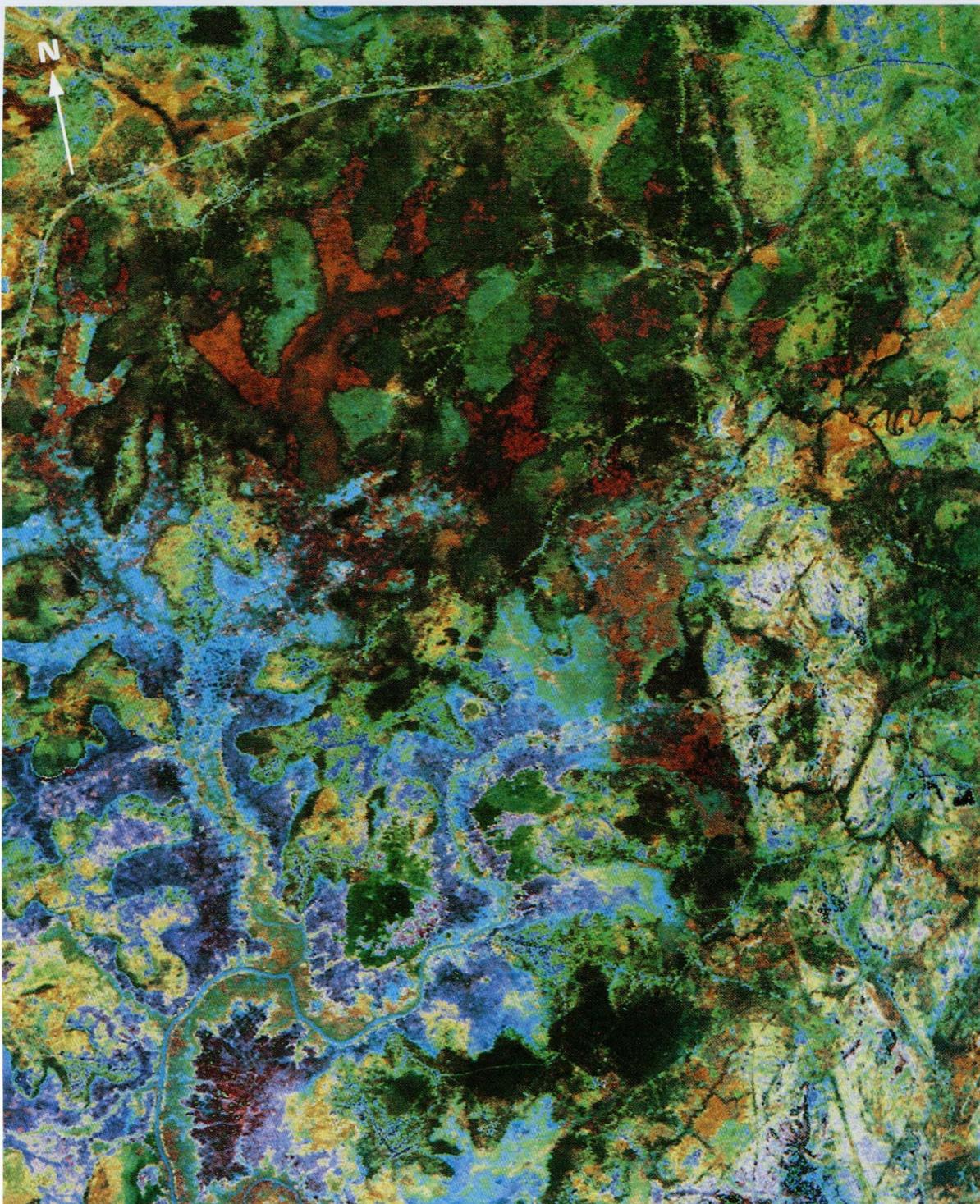


Figure 5 : Région de Songolon - Image colorée d'un stretching sinusoidal de l'image Spot XS K 028-J329.

bauxites pures et de bauxites ferrugineuses telles que les révèlent les analyses chimiques des échantillons prélevés au sol ; l'extension d'un certain type de latérite, source de problèmes d'exploitation, peut être précisée sur ces images, réduisant les études sur le terrain et permettant une économie sensible ;

- la géologie structurale : le bassin bauxitique est contrôlé par un système de failles N.NE-S.S.W et N.NW-S.S.

\* Sur l'aménagement portuaire visant à augmenter la capacité du petit port de Kamsar, situé à l'em-

bouchure du Rio Nunez, où l'interprétation de l'image Spot résultant d'un traitement de type optimisation locale a précisé l'emplacement des bancs de sable et les passes de haut fond qui barrent la rivière en aval du port.

\* Pour l'alimentation en eau potable où l'interprétation des images Spot (fig. 4) a d'abord permis, en se fondant sur l'étude préliminaire réalisée sur le terrain, d'individualiser les unités géologiques principales : schistes de Telimele, subaffleurements et contrôlés par forages, grès de Kindia et surtout formations fluvio-deltaïques, sables et argiles du bassin de Songolon, qui contiennent l'aquifère, et

d'en préciser l'extension sur une région encore mal cartographiée, la seule carte, très ancienne, étant à l'échelle 1:500 000. Les différences spectrales de l'image Spot (fig. 5) soulignent aussi l'influence superficielle des marées.

Cette interprétation met en évidence le système de fractures qui affectent les différentes formations et favorisent la circulation des eaux souterraines. La fracturation est très bien marquée, soulignée par la végétation, la corrélation est excellente entre les failles interprétées à partir des données Spot et des photographies aériennes et les mesures effectuées sur le terrain et la mise en oeuvre simultanée de ces techniques met en évidence les possibilités de recharge de l'aquifère du bassin de Songolon par les réseaux de failles des grès de Kindia. On montre ainsi que l'écoulement des eaux s'effectue d'est en ouest selon des accidents d'orientation N60° et que le drainage assuré par ces failles aboutit sur la faille principale d'orientation N170 limitant à l'Ouest les grès de Kindia en position de horst. On démontre enfin sur le terrain le rôle de drain majeur de cette faille qui met en contact les grès avec un compartiment étanche des schistes. De ce fait, la nappe aquifère du bassin de Songolon peut être rechargée par tous les accidents d'orientation N60° lorsque les formations fluvio-deltaïques recouvrent les grès de Kindia et leur point d'intersection avec la faille Nord-Sud représentent des sites privilégiés de forages d'exploitation.

Cette étude et les résultats obtenus sont intéressants à plusieurs titres :

- le succès résulte en grande partie du fait que les problèmes étaient bien posés et étaient en parfaite adéquation avec les possibilités de télédétection ;
- la méthodologie était bien adaptée, en particulier en ce qui concerne la ressource en eau. Après une phase préliminaire de reconnaissance, la mise en oeuvre de la télédétection a permis au géologue structuraliste de transformer une information de type statique - le tracé des accidents - en une vision dynamique - comment l'eau circule-t-elle dans ce système tectonique complexe. Parfaitement intégrée aux différents stades de l'étude, la télédétection est devenu un outil performant : interprétation des données de télédétection Spot, étude structurale sur le terrain, réalisation de profils géophysiques et de sondages de reconnaissance, ont permis de définir les emplacements des trois forages d'exploitation effectués avec succès dans la région de Kamsar, avec un débit moyen de 135 m<sup>3</sup>/h.

#### 4. TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE GEOLOGIE EN REGION TEMPEREE

Dans le souci d'évaluer le potentiel d'utilisation de la télédétection pour les applications géologiques

dans différents contextes morphoclimatiques, on a choisi la région des Mauges (Maine-et-Loire, France) en raison des difficultés qu'y rencontre le géologue cartographe et de son intérêt minier (Berthiaux *et al.*, 1988). Sur cette zone d'expérimentation, les informations recueillies par différentes techniques de télédétection, Landsat TM et SPOT, sont confrontées aux résultats obtenus par d'autres méthodes, cartographie, géophysique, géochimie.

La série des Mauges est une unité constituée de micaschistes épi à mésozonaux précambrien comprenant différents termes, métapelites et métagrauwackes à la base, amphibolites dominantes ensuite, formant la série de Beaupréau d'origine volcanique, métapelite et métagrauwackes d'origine sédimentaire au sommet. La surface du plateau des Mauges est affectée par une forte altération météoritique qui pénètre profondément le substrat micaschisteux. Il s'ensuit une argilisation pouvant atteindre 10 mètres et plus. Les minéralisations connues sont associées à la base de formation de Beaupréau. Elles sont situées au voisinage des schistes graphiteux. Dans les champs, on rencontre des blocs d'oxyde de fer de taille variable.

Dans ces conditions, la cartographie géologique et minière est difficile. Elle est réalisée essentiellement par analyse géochimique multiéléments. Son objectif est de reconstituer le bâti lithostructural de la série des Mauges sous le masque des formations superficielles et en particulier de déduire la lithologie du substrat à partir des caractéristiques des altérites qui la recouvre et dont elles sont issues. Il s'agit donc pour la télédétection de trouver s'ils existent des indices de surface caractéristiques de ces séries.

Le traitement interactif des données satellitaires sur écran de visualisation a permis de sélectionner les combinaisons de canaux qui rendent le mieux compte de la géologie telle qu'elle est connue actuellement. Les différenciations rendues possibles par la combinaison des canaux Spot, quelque soit la date d'acquisition (avril ou août 1987) sont au nombre de 2 et leurs limites sont peu précises car les contrastes sont faibles. Les différenciations résultant de la combinaison des canaux TM (juin 1985) sont au nombre de quatre et sont assez bien marquées. Sur ces images, la meilleure discrimination de faciès est obtenue par la combinaison des canaux 4, 5 et 2 codés en rouge, vert et bleu respectivement. Dans cette configuration, le faciès TM1 représente la réponse spectrale de l'altération des métavolcanites de la formation de Beaupréau telle qu'elle est reconnue dans la région de Le Fief-Sauvin, Beaupré, Jallais, ainsi que dans le secteur de Cossé d'Anjou. Cette formation affleure sur les seuls versants exposés aux intempéries, à la faveur du décapage des couches superficielles et le critère utilisé sur le terrain pour caractériser le couple altérite-roche mère dans les zones aveugles est dans ce cas, la relative rareté des éléments quartzeux, par comparaison avec les produits d'altération des au-

tres termes de la série. Cette différence semble influencer la réponse spectrale perçue depuis le satellite, mais le critère sur lequel elle est établie n'est pas complètement fiable et ne peut être utilisé seul.

Le faciès TM2, se corrèle assez bien avec les niveaux ampélitiques de la base des métavolcanites de Beaupréau dont ils soulignent le contour dans l'aire connue de son extension. L'observation de terrain confirme la correspondance de ce spectrofaciès avec l'altération des schistes graphiteux qui donne des sols sombres dont l'extension est cependant plus restreinte que ce qu'il paraît sur les images TM, sans doute parce que les altérites ne sont pas toujours in situ.

Dans la vallée de l'Evre et au Nord de Saint-Pierre-Montlimart, un spectrofaciès assez semblable se développe dans une région où seuls les métasédiments de la série inférieure des Mauges affleurent dans les vallées encaissées. La réponse spectrale qui définit le faciès TM2 dans ce secteur, n'a pas ici de relation avec les niveaux ampélitiques. Elle paraît cependant traduire la relative abondance d'affleurements du substratum et la moindre épaisseur du recouvrement superficiel qui prévalent dans ce secteur. La même hypothèse peut être avancée pour la plupart des plages de faciès TM2 réparties le long des vallons affluents du Layon en particulier.

Sur le plateau des Mauges, le faciès TM2 est présent sous la forme de plages épaisses qui ont été contrôlées sur le terrain. Elles correspondent à des pélites altérées et des pélites affleurantes sans que l'on puisse affirmer leur appartenance au niveau de base de la formation de Beaupréau. Il s'ensuit que si ce critère spectral a toujours une signification géologique, la relation observée n'est pas univoque.

Le faciès TM3, blanc à gris bleuté, au contour diffus correspond à différents types d'altérites résultant de substrats divers : Tertiaire, Crétacé en particulier.

A l'analyse de cette image, on constate que les réponses spectrales des altérations superficielles sont influencées à travers le canal 5, par l'état hydrique des sols et de la végétation qui est fonction des caractéristiques granulométriques et minéralogiques des formations superficielles. Mais pour affirmer que ces réponses spectrales révèlent toujours dans ce contexte la formation de Beaupréau, il faut maintenant démontrer la spécificité de ces caractéristiques.

L'image de la combinaison 6-3-1 présente une grande similitude avec celle de la combinaison précédente. L'influence du canal 6, thermique se fait sentir et augmente le potentiel de discrimination soit de faciès nouveaux (TM4, altérite sur substrats divers, mais différents de TM3) soit entre faciès et gradient thermique voisin traduisant le comportement de deux types d'altérites, celles de la formation de Beaupréau et celles des granodiorites de Cossé d'Anjou. D'autres plages de gradient thermique plus faibles constituent ailleurs des taches épaisses sur le plateau, sans ordre apparent et certaines d'entre elles ont été contrôlées sur le terrain

: elles correspondent toutes à des gisements de sables ou de faluns dont l'extension est exagérée par la perception spatiale soit du fait de la fonction de transfert, qui prend en compte le proche environnement, soit à cause des colluvions alimentées par les affleurements de sable et faluns qui étalent alors la réponse spectrale de façon naturelle.

Dans d'autres régions, en vallée de l'Evre par exemple, les réponses thermiques enregistrées sont influencées par les variations d'épaisseur des formations d'altération laissant transparaître plus ou moins la série métasédimentaires.

La confrontation des réponses spectrales et des cartes géochimiques multi-éléments montre une relation variable pour l'ensemble des termes de la série mais excellente pour la formation de Beaupréau : il y a une correspondance très claire entre la répartition du chrome et du vanadium, l'extension du spectrofaciès et la forme cartographique de la formation là où elle est actuellement cartographiée. Et dans le prolongement de la structure du Cossé d'Anjou, au-delà des zones cartographiées sur le terrain, anomalies en chrome et vanadium et plages du spectrofaciès type Beaupréau se corrélaient assez bien. Par ailleurs, certaines discontinuités "images" qui sont des fractures potentielles, sont corrélées avec des anomalies géochimiques soulignant ainsi la spécificité métallogénique de ces orientations.

La confrontation des réponses spectrales avec la carte des anomalies de conductivité révélées par la prospection électromagnétique montre une excellente corrélation en ce qui concerne les schistes graphiteux, principal repère de reconstitution structurale de la série des Mauges. Les caractéristiques minéralogiques des niveaux graphiteux en font un excellent marqueur géophysique et les sols associés ont une réponse spectrale distincte. Pour les autres termes de la série la corrélation est moins évidente.

En conclusion, dans le contexte du plateau des Mauges, les données de type visible Spot ne permettent pas d'appréhender des différenciations spectrales utilisables en cartographie géologique. Par contre, les données spectrales moyen infrarouge et infrarouge thermique apportent des informations appréciables. Les observations de terrain expliquent la réponse spectrale de la formation de Beaupréau. Cette réponse spectrale n'est pas totalement univoque si la démarche est uniquement fondée sur la télédétection, mais elle est nette lorsque la série est affleurante, sub-affleurante ou que son altération spécifique domine et sa répartition géographique confirme la cartographie faite à partir des analyses géochimiques.

## 5. TELEDETECTION EN REGION EQUATORIALE

La problématique spécifique aux différentes zones géographiques impose de sélectionner parmi les techniques de télédétection disponibles, celle qui paraît le mieux appropriée : l'exemple de l'inventaire du Gabon, réalisé à partir de 1980, permet de

justifier cette proposition. Pays au large potentiel minier, ce territoire a été largement prospecté et, sa géologie était relativement bien connue localement à des échelles allant de 1:200 000 à 1:50 000, mais sur la majeure partie du pays, il existait seulement une cartographie générale de reconnaissance à l'échelle 1:500 000. Dans le cadre du plan de développement 1980-1981, le gouvernement de la République Gabonaise et son Service géologique ont décidé d'un vaste programme d'inventaire systématique des ressources naturelles, fondé sur l'acquisition et la valorisation d'une couverture radar latérale aéroportée sur l'ensemble du pays, un levé géophysique et scintillométrique sur des zones localisées. La société SODETEG a assisté le Service Géologique du Ministère des Mines et des Hydrocarbures dans la tâche de maître d'oeuvre. Elle a conseillé le choix du radar qui s'imposait, du fait de ses caractéristiques tous temps car la couverture nuageuse est forte et constante dans ce pays, et du pseudo-relief qu'il restitue, car il est nécessaire en forêt équatoriale pour interpréter la morphologie (Baeltz-Manière et Gilli, 1988).

Dans le cadre de la partie de l'inventaire minier, confiée au B.R.G.M., les coupures Mitzic, Boué et Mouila, situées sur l'emprise du chemin de fer transgabonais ont été cartographiées et prospectées en détail. Une synthèse géologique (Prian *et al.*, 1988) de chacune des feuilles a été réalisée à l'échelle 1:200 000 grâce au travail d'une équipe franco-gabonaise et à la mise en oeuvre de diverses méthodes. La prise en compte, dans ce contexte, des informations interprétées de la radargraphie a été fructueuse pour le projet, en particulier sur la coupure Mouila. Le socle archéen y constitue la zone la plus étendue mais l'ensemble est très diversifié, présence des séries panafricaines au sud ouest et du Proterozoïque inférieur au nord est.

\* Une étude conjointe des radargraphies et des photographies aériennes a été réalisée, la première à l'échelle 1:200 000, la seconde à l'échelle 1:50 000 chaque coupure étant ensuite réduite. Dans ce contexte climatique, la mosaïque radar s'est imposée comme un support topographique de qualité (Brosse et Scanvic, 1986).

D'une manière générale, la photographie aérienne permet de faire une différenciation poussée et un détournement précis des unités morphologiques. Elle permet de réaliser aussi un inventaire exhaustif des photofractures. La radargraphie permet de faire des corrélations à distance entre des faciès qui n'apparaissent pas de façon claire comme identiques sur des photographies aériennes éloignées. Elle permet aussi une représentation pondérée des fractures en fonction de l'importance de leur trace dans la morphologie.

La corrélation entre les deux cartes est très variable selon le type de modelé morphologique :

- pour un modelé très accentué, la radargraphie permet plus de différenciations dans le domaine cristallin situé à l'ouest de la faille de l'Ikobi ;

- pour un modelé peu accentué, des différenciations très fines sont possibles en photogéologie, par exemple dans les formations sédimentaires du synclinal de la Nyanga ou localement dans la série de l'Ogooué ;

- en modelé "moyen", les similitudes sont très nettes comme dans le massif du Chaillu.

On constate des lacunes d'observation qui sont la conséquence des caractéristiques technologiques des différents capteurs :

- absence d'observation sur les photographies aériennes des régions où la couverture nuageuse est persistante,

- lacune d'observation sur les radargraphies lorsque les morphologies sont mal orientées par rapport au faisceau radar. L'exemple caractéristique est celui de la limite schisto-calcaire, schisto gréseux soulignée, par une cuesta dont le regard est dans le même sens que celui du faisceau radar.

A cette échelle de reconnaissance, la radargraphie est la source d'une information relativement voisine de celle fournie par les photographies aériennes mais pour un coût largement inférieur.

\* La comparaison carte géologique, schématique (Prian *et al.*, 1988) et interprétation des radargraphies traduit de façon éloquente le potentiel de la télédétection micro-onde active dans les conditions qui sont celles de la région : forêt équatoriale épaisse (30 à 40 mètres de hauteur), nébulosité constante et forte tout au long de l'année, épaisseur des altérites (40-60 mètres...) mais aussi variations lithologiques suffisamment significatives pour induire des morphologies caractéristiques perceptibles grâce à l'effet de relief produit.

La comparaison des images du magnétisme et la radiométrie avec l'interprétation radar permet par les corrélations qu'elle induit, de renforcer le poids de certaines informations. C'est le cas par exemple en radiométrie :

- des dômes gneissiques de Bouvondo et Moukandza, soulignés par leur bordure volcano-sédimentaire et de roches vertes,
- du granite de Bapindji et les migmatites de Waka,
- des failles de l'Ikoy et d'Ogoulou Offoué,
- des granitoïdes du Chaillu

Le magnétisme amplifie de son côté les caractéristiques structurales du granite du Chaillu dans la région du sud d'Iboundjé, souligne la bordure orientale du dôme Moukandza et la faille de l'Ikoi.

Ces observations ont enfin un double intérêt méthodologique : elles soulignent la continuité de la représentativité géologique du signal électromagnétique enregistré en radiométrie et télédétection aéroportées, et justifient par leur complémentarité la mise en oeuvre numérique de combinaison de diverses données.

\* Enfin, la comparaison des images géochimiques obtenues à partir des mesures sur "stream sediments" et matériaux alluvionnaires avec l'interprétation de la radargraphie donne aussi une idée de l'importance cartographique des synergies sur des régions où les seules informations lithologiques déduites d'affleurements épars sont limités. Chaque carte de répartition apporte un élément de cartographie qui renforce l'interprétation de la radargraphie.

Ainsi, la réinterprétation des radargraphies, fortement et logiquement intégrée dans l'ensemble des méthodes mises en oeuvre pour optimiser, à partir des données acquises en 1980, la cartographie géologique de zones difficiles, a prouvé son impact dans cette opération, au-delà même de ce qui avait été pressenti, avant la confrontation directe avec le terrain.

## 6. TELEDETECTION, PLAN MINERAL ET PROSPECTION EN MILIEU ARIDE

Le B.R.G.M. a réalisé entre 1978 et 1982, pour le compte du Service géologique du Soudan, l'exploration géologique et minière de la province des Red Sea Hills, dans le nord-est du pays. Cette prospection a été précédée par la réalisation sur l'ensemble du territoire, 3 millions de km<sup>2</sup>, d'une carte géologique de synthèse, à l'échelle 1:2 000 000 à partir des documents d'archive et d'une interprétation de quelques 100 images Landsat.

La cartographie géologique à l'échelle 1:250 000 des Red Sea Hills a été fondée sur la réalisation d'esquisses photogéologiques sur les zones où existaient des photographies aériennes. Les levés sur le terrain s'appuyant sur ces esquisses ont montré rapidement l'existence d'une série volcano-sédimentaire, la série d'Ariab, et d'un potentiel de minéralisations en or et cuivre associées à ce métallotecte. C'est alors que la télédétection spatiale a été à nouveau utilisée pour préciser l'extension de la série d'Ariab dans l'ensemble des Red Sea Hills. Une mosaïque d'images Landsat en noir et blanc, canal 7, a été réalisée à l'échelle 1:500 000. Son interprétation calée sur les observations cartographiques de la première phase des levés a permis de préciser l'extension de cette série jusqu'à la Mer Rouge, la position des grands accidents qui l'affectent et compliquent sa cartographie au sol, confirmant sa continuité, de part et d'autre de la Mer Rouge, avec des formations identiques connues en Arabie Saoudite.

La mise en oeuvre de cet ensemble de démarches a eu plusieurs conséquences économiques favorables : elle a rapidement réduit la surface à cartographier en précisant l'extension du métallotecte et elle a permis de repenser la stratégie de prospection en la focalisant au plus près des ports et des côtes. Au total le temps entre le début de la reconnaissance cartographique et la découverte a été réduit de moitié.

Par la suite, la méthodologie fut améliorée et la préparation des levés sur cette région fut fondée sur l'analyse numérique des données Landsat MSS, de façon interactive par les géologues de terrain. Les documents résultant de ce travail, présentés à l'échelle 1:250 000 ont été utilisés sur le terrain : ils ont permis des extrapolations entre points d'observation, la localisation de détails ou faciès à contrôler et ont ainsi permis un gain de temps pour les levés et la prospection. Ces documents situent séries et faciès dans leur contexte régional, précisent les observations faites au sol sur des sites isolés, et révèlent l'extension des ensembles, unités, complexes géologiques en-dehors des zones de recherche ou d'accessibilité. Les chapeaux de fer ont été pour la plupart individualisés par leur forme, mais ils n'ont pas été identifiés en tant que tel par leur réponse spectrale car le fer est omniprésent sous la forme d'une patine d'oxydation.

Le résultat final obtenu avec le concours de la télédétection, est la découverte en quelques années dans cette région jusqu'alors mal explorée d'une ceinture cuprifère comprenant de nombreux amas sulfurés exploitables. Pour des raisons économiques le seul potentiel en or a été valorisé et un gisement mis dès cette année en exploitation à Hassai. L'environnement géologique et structural du prospect est maintenant bien connu mais continue de faire l'objet de recherches, et les aménagements nécessaires à son exploitation nécessitant des études complémentaires, en particulier pour assurer l'approvisionnement en eau. Compte tenu des spécificités géologiques et climatiques, roches ignées acides et basiques, chapeaux de fer, altérations hydrothermales, patines désertiques, écoulements temporaires dans les Wadi, on a privilégié pour ces nouvelles études l'utilisation des données du Thematic Mapper de Landsat V : résolution 30 mètres, donnant accès aux gammes spectrales infrarouge moyen et thermique.

Cette nouvelle étude, orientée vers une mise au point méthodologique aboutit à des conclusions précises, mais relatives du contexte régional sur :

- l'accessibilité à la gamme spectrale infrarouge moyen. En région aride où l'exposition des affleurements est bonne, elle augmente les possibilités de discrimination sur la base du seul critère de réflectance, même la teneur en eau influençant fortement certaines réponses au niveau de 1.5 micron.

- La réponse thermique. Elle permet de s'affranchir partiellement du masque créé par la patine d'oxydation caractéristique des roches en région aride et la capacité de discrimination est ainsi très largement améliorée.

- les différentes restitutions photographiques réalisées, fausse couleur (4.3.2) infrarouge moyen (7.4.2) infrarouge thermique (6.7.4) et composantes principales. Elles révèlent que l'on augmente les possibilités de discrimination si l'on associe les critères spectraux et les critères texturaux ce qui par parenthèse est traditionnellement réalisé en photo-interprétation. C'est le cas par exemple des niveaux acides et

basiques de la série volcano-sédimentaire qui ont une réponse spectrale similaire mais des textures différentes. Ainsi, les niveaux acides sont orientés car leur schistosité est bien développée, alors que les niveaux basiques sont massifs.

- la capacité d'utilisation en hydrogéologie. L'apport de la télédétection se situe au niveau lithologique, structural et de la mise en évidence des sous-écoulements dans les wadis : ceux-ci sont clairement visualisés sur les photographies à composante infrarouge et surtout infrarouge thermique. Précisées sur le terrain par analyse structurale, ces différentes observations ont permis de sélectionner des emplacements où les forages sont actuellement en cours.

## 7. TELEDETECTION ET MOUVEMENT DE TERRAIN

Les méthodes mises en oeuvre pour inventorier les zones vulnérables aux mouvements de terrain ont été jusqu'alors la photo-interprétation, utilisée en complément des levés sur le terrain. La télédétection a été peu utilisée, car les données spatiales disponibles avaient une résolution inadaptée à la taille moyenne des cibles (Landsat MSS) ou n'offraient pas de vision stéréoscopique (Landsat TM).

En parallèle, la conception cartographique a évolué et de nombreux paramètres, accessibles à des degrés divers par télédétection sont pris en compte dans l'élaboration des documents : carte d'occupation du sol et carte des pentes par exemple.

Les données Spot et leur potentiel de produits dérivés offrent dans ce contexte des possibilités dont l'étude fait l'objet d'une étude-pilote réalisée sur le site de La Paz en Bolivie (Humbert *et al.*, 1989).

Ce site a été choisi car la variété et le nombre des mouvements de terrains connus dans la cuvette du rio La Paz en font une zone exceptionnelle d'expérimentation. Déjà, en 1976, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et le Bureau Central d'Etudes Outre-Mer ont étudié ce risque naturel pour la municipalité de La Paz et réalisé des cartes de constructibilité. Ce travail, largement étayé par l'interprétation des photographies aériennes, sert de référence historique.

Les documents réalisés et utilisés sont un couple stéréoscopique panchromatique 10 mètres de résolution acquis selon un angle de 18° vers l'ouest (vue droite) et 15° vers l'est (vue gauche) ; des données multibandes de résolution 20 mètres acquises le 9/09/88 qui ont permis de réaliser par classification dirigée automatique une carte d'occupation du sol et sont la source d'informations nouvelles sur la tectonique régionale ; un modèle numérique de terrain, réalisé à partir des données Spot

stéréoscopique par la Société ISTAR. Il est à l'origine d'une cartographie automatique du réseau hydrographique et des vues panoramiques par mélange avec l'imagerie panchromatique ou couleur correspondante.

L'image Spot stéréoscopique permet d'obtenir des informations de type régional sur la géologie, la géomorphologie, la tectonique et les mouvements de terrain (fig. 6).

\* Les faciès les plus caractéristiques de l'image sont associés aux principales formations géologiques (Bles, 1977) :

- formations d'âge crétacé et dévonien, affleurantes principalement sur la Sierra Aranjuez,

- formations de l'Altiplano : la formation lacustre de La Paz, au sud et au nord d'Achocalla, la formation de Calvario au nord, les formations de Kaluyo et Chonchocoro sur l'Altiplano,

- dépôts et glissements de la cuvette de La Paz : on distingue par leur forme et leur teinte, les glissements anciens et récents, par leur seule forme, les glissements en masse des coulées.

Dans ce contexte particulier, la précision des contours est excellente et l'interprétation est beaucoup plus détaillée que celle issue des photographies aériennes à l'échelle 1:120 000 (cf. Vargas, 1977).

\*<sup>3</sup> Du nord au sud de l'image Spot, on caractérise les unités morphologiques suivantes :

L'unité 1\*, est caractérisée par la présence de vallées suspendues dont les profils traversés indiquent une action glaciaire et fluviale.

L'unité 2\* occupe la partie centrale de la cité de La Paz. Elle est caractérisée par de nombreux glissements spécialement dans la formation de La Paz.

L'unité 3\*, au sud, correspond aux coulées boueuses d'Achocalla. On y distingue des masses perturbées anciennes, des réactivations à Rosas Pampas et Villa Cota, la zone d'approvisionnement et la langue d'un grand torrent de boue (coulée de Mallassa).

L'unité 4\* est associée à une chaîne de montagne orientée NW-SE établie dans les formations du Paléozoïque et du Mésozoïque.

L'unité 5\* regroupe les dépôts fluviaux.

L'unité 6\* correspond à l'Altiplano, plateau dominant la ville de La Paz.

\* Le contexte géologique régional est caractérisé par l'abondance des formations meubles et les indices de failles visibles au sol sont assez rares. L'image Spot à l'échelle 1:100 000 permet un inventaire

<sup>3</sup> Les numéros renvoient à la fig.



complet des discontinuités révélant des failles connues et l'élargit à des accidents potentiels, souvent parallèles à la direction des accidents identifiés au sol.

On s'est spécialement intéressé aux discontinuités de direction NW-SE car ces failles sont de type normal et affectent les formations de l'Altiplano où elles provoquent des dénivelés visibles sur la surface actuelle du plateau.

Du nord au sud les failles reconnues sur le terrain sont repérables sur l'image Spot :

- la faille d'Alto Lima au nord,

- les failles en échelon d'Alpacoma (11) dont le rejet vertical varie entre 5 et 15 mètres d'après les sondages électriques. La dénivelée en surface, en bordure de l'Altiplano peut être appréciée sur l'image Spot et montre en particulier que le compartiment nord-est est affaissé.

- les failles de Radio Cruz del Sur qui provoquent d'après les sondages électriques, un rejet de 10 à 30 mètres, dans les formations de l'Altiplano. La dénivelée en surface de l'Altiplano est de quelques mètres, inférieure à celle des failles de l'Alpacoma. Elle est appréciable par l'intermédiaire de zones de sols hydromorphes qui jalonnent l'accident. La branche nord de ce faisceau se prolonge vers l'ouest, sur l'Altiplano : cette extension, non connue sur le terrain est mise en évidence sur l'image XS.

- les failles d'Achocetta qui n'ont pas d'extension régionale comme les précédentes. L'une d'elle est connue au sol, l'autre pas. Elles sont responsables d'une dénivelée appréciable sur les images Spot.

De ces différents accidents, seuls les deux plus importants sont détectables sur les photographies aériennes (Vargas, 1977).

\* Les grands mouvements sont interprétables sur l'image à l'échelle 1:100 000 à condition (sauf quelques exceptions) d'avoir la vision en trois dimensions. On peut identifier et cartographier dans le détail, les glissements anciens simples (Killi-Killi, Jucamurani, Pampajazi, Kayu) ou plus complexes (Villa Concepcion) ; délimiter la grande coulée de Mallassa du glissement complexe d'Achocalla, souvent réactivé ; cartographier les mouvements qui affectent la ville de La Paz, Villa Armonia, Villa Salome, Llojeta ; proposer une classification de type ancien, intermédiaire, récent.

L'analyse géométrique des différents mouvements au niveau de la zone d'arrachement permet de conclure, dans le contexte géomorphologique de La Paz à l'existence à des degrés divers d'importance de trois types d'amorce de rupture :

• les ruptures circulaires (E) à Pata Patani, Radio Cruz, Pampajazi,

- les ruptures planes suivant une discontinuité de direction subparallèle au bord de la fosse et de pendage orienté vers la fosse (Killi-Killi),
- les ruptures en coin.

Cette analyse conduit à localiser en-dehors des régions réputées instables des zones à risques potentiels :

• à partir de formes circulaires visibles en surface, à proximité de la bordure de l'Altiplano d'une part (région Amachumani au sud, Pata Patani au nord) et sur le glissement ancien de Pampajazi,

• à partir de failles en coin : région d'Achocalla.

\* L'approche comparative entre les données et cartes de 1975-1977 et l'interprétation actuelle de l'image Spot 1988 apporte des informations intéressantes à plusieurs niveaux :

• la croissance de la ville de La Paz : le développement urbain est très net sur l'Altiplano au nord et au sud de l'aéroport. On l'observe aussi en dépit des règles de sécurité le long et à proximité des failles d'Alpacoma dont le caractère néotectonique reconnu au sol est confirmé par l'observation depuis l'espace. Dans la cuvette, les développements urbains observés à Villa Armonia, San Antonio et sur l'ancien glissement de Pampajazi sont inquiétants compte tenu des bouleversements visibles ou prévisibles (amorce d'affaissement circulaire de Pampajazi).

• l'effet des travaux de confortement réalisés depuis 1976 dans la région de Killi Killi.

• l'effet de l'urbanisation intensive de la zone Cementerio d'où transparait une série de "ruptures linéaires" discrètes orientées NW-SE parallèlement aux failles néotectoniques de l'Altiplano. Des directions semblables s'observent à l'ouest de Killi Killi, en limite de la formation de Calvario, et au SW, sur la terrasse du Rio Achachicala.

• de nouveaux glissements ou réactivations de glissements anciens apparaissent lorsqu'on compare les deux types de documents.

En conclusion cette étude montre que l'ensemble des produits Spot se substitue avantageusement à la photographie aérienne en tant que méthode d'appréciation du risque de mouvement de terrain. C'est en complément des levés sur le terrain un outil optimal, sans concurrence actuelle des autres systèmes satellitaires.

## 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les exemples présentés, et d'autres encore, témoignent que l'évolution des techniques de télédétection et de leur méthodologie d'utilisation ouvre à cet outil de nombreux domaines d'application géologique : cartographie géologique et struc-

turale à des fins de prospection minière, pétrolière, d'approvisionnement en eau, étude de certains risques naturels. Jusqu'à certaines échelles, la télédétection aérospatiale se substitue avantageusement, de par ses qualités spécifiques, à la photographie aérienne sans pour autant être banalisée comme cette dernière.

Les raisons de cette ouverture sont multiples. C'est d'abord l'élargissement des possibilités de choix : la télédétection est un ensemble de techniques plus ou moins disponibles certes, parmi lesquelles il est possible de choisir en fonction des objectifs à atteindre et du contexte climatique.

Ensuite, passé l'instant pendant lequel on a voulu voir dans la télédétection une discipline autonome, ce qui peut être parfois vrai, permettant d'atteindre seul l'objectif, il est devenu évident pour tous qu'elle est un outil complémentaire de ceux déjà utilisés par le géologue. Insistons ici sur deux règles importantes dont l'application permet d'optimiser les résultats : ne pas chercher à reproduire ce qui peut être fait avantageusement par d'autres techniques et intégrer l'outil dans la suite logique des démarches et procédures mises en oeuvre en géologie appliquée.

Au niveau de la préparation des documents cartographiques, il faut insister sur l'importance en phase de traitement numérique, du dialogue interactif qui permet d'optimiser les choix : il ne faut pas oublier qu'il n'y a pas de recette applicable systématiquement, mais que le principe des logiciels thématiques permet d'en raisonner la mise en oeuvre. De plus, il faut toujours adapter ces logiciels aux conditions régionales et cela justifie largement l'interactivité.

Toute cette méthodologie s'impose plus encore lorsque l'on veut mettre en oeuvre des procédures automatiques, dont la nécessité, se justifie de plus en plus, mais que le raisonnement du naturaliste a du mal à admettre.

Peut-on par exemple classer automatiquement les objets géologiques sur des bases purement spectrales, en s'appuyant sur la démonstration en laboratoire de relations étroites entre réflectance et lithologie ? Si l'on considère que la plupart du temps les affleurements sont rares, pollués, le résultat de la classification aléatoire alors que le cerveau humain intégrant différents paramètres, parvient bien souvent à un résultat de meilleure qualité, faut-il pour cela déclarer forfait ? Des voies de recherche sont actuellement explorées que l'on souhaite concluantes pour deux raisons majeures :

- l'information spectrale qui sera recueillie dans un proche avenir sera de plus en plus importante, 268 canaux sur EOS, et l'oeil n'y suffira pas.

- ensuite, une conception cartographique nouvelle se développe, fondée sur les systèmes d'informations géographiques, et la télédétection, lien naturel entre les différentes Sciences de la Terre et du milieu doit y avoir une place de choix.

Les recherches actuelles portent d'abord sur l'élargissement des classifications aux critères structuraux et texturaux. Elles supposent une meilleure connaissance des interactions potentielles entre les différents éléments du milieu naturel : végétation, sol, géologie.

Il semble aussi que les MNT spatiaux puissent avoir une importance qui ne fera qu'augmenter. On imagine déjà, les bases existant, une photo interprétation en vision à trois dimensions, intégrant et modifiant l'archive... le tout selon un code directement numérique.

Quoiqu'il en soit, compte tenu de ce à quoi il peut prétendre, l'outil télédétection sera vraiment considéré lorsque son utilisation, comme celle de la photo aérienne dont il est l'héritier, sera parfaitement banalisée et ce jour est très proche.

## BIBLIOGRAPHIE

BAELZ-MANIERE, S. & GILLI, J., 1988 - Programme d'acquisition des données aéroportées et leur interprétation. *Chron. Rech. Min.*, 491: 3-12.

BERTHIAUX, A., CLEMENT, J.P., MINOUX, L. & WYNS, R., 1987 - La région des Mauges. Analyse et comparaison des données spatiales Spot et TM. Corrélation avec les connaissances géologiques. *Rapport BRGM 87 DT 043 TED*: 1-39.

BLES, J.L., 1977 - Cuadro geologico general. Neotectonica et sismicidad de la region de La Paz. Bolivie. *Rapport B.R.G.M.*

BROSSE, J.M. & SCANVIC, J.Y., 1986 - Etude morphologique et structurale des radargraphies et des photographies aériennes de la Feuille Mouila (Gabon). *Rapport BRGM GAB 003 GEO*: 1-23.

BROSSE, J.M., DUTARTRE, Ph., GIRAULT, F. & SCANVIC, J.Y., 1987 - Rôle de SPOT dans le développement des applications géologiques de la télédétection (région de Kamsar). In : SPOT : utilisation des images - bilan résultats, novembre 87, Paris, CNES.

HUMBERT, M., SCANVIC, J.Y. & GIRAULT, F., 1989 - Mouvements de terrain. Aménagement et imagerie SPOT La Paz. *Rapport BRGM Bolivie 88 BOL 213 TED*: 1-26.

LAJOINIE, J.P. & WEECKSTEEN, G., 1985 - Télédétection et recherche minière. Simulations SPOT en Nouvelle-Calédonie, application au nickel oxydé. *Rapport BRGM 85 NCL 049 GEO*: 1-25.

PARIS, J.P., 1981 - Géologie de la Nouvelle-Calédonie. *Mémoire BRGM*, Orléans.

PRIAN, J.P., SIMEON, Y., VERA, J., LEDRU, P., PIANTONE, P., COSTE, B. & N'DONG, J.E., 1988 - Valorisation géologique de l'inventaire minier de l'Archéen et du Protérozoïque inférieur des feuilles Mitzic,

Boué et Mouila à 1:200 000 (Gabon). *Chron. Rech. Min.*, 491: 67-104.

SCANVIC, J.Y., 1987 - Etude par télédétection Spot du bassin de Poukoussa (Guinée) en appui à la prospection des ressources en eau. *Rapport BRGM 87 ED 5*

SCANVIC, J.Y., 1988 - Contribution de la télédétection à la connaissance structurale et à la prospection minière de la Nouvelle-Calédonie Orientale. *Rapport BRGM 88 NCL 098 TED: 1-14.*

VARGAS, E., 1977 - Sintesis fotogeologica de la Cuenca de La Paz y Abredorez. Las consultoras B.R.G.M. - B.C.O.MM. Plan de desarrollo urbano - Ciudad de La Paz. *Rapport du B.R.G.M.*

Manuscrit reçu le 15 septembre 1989 et accepté pour publication le 28 décembre 1989.