

Télédétection et télégestion des informations géologiques : Application à la région du Sud Lipez (Bolivie).

Eric PIRARD
Fernando CACERES

Université de Liège
Département GéomaC
Géoressources Minérales et Imagerie Géologique
Sart Tilman B52/3 4000 LIEGE

1. Introduction

Toutes les nouvelles technologies de l'information ne sont pas indispensables au développement des régions les plus défavorisées de la planète. Mais, parmi celles-ci, deux se distinguent indubitablement aux yeux de l'ingénieur géologue. D'une part les techniques de télédétection qui permettent des observations de plus en plus précises au départ de plates-formes aéroportées ou satellitaires et d'autre part les techniques de télégestion des données (S.I.G. ou systèmes d'information géographiques) qui permettent une gestion dynamique des informations cartographiques. Bien qu'apparaissant comme une discipline déjà classique, la télédétection géologique est encore loin d'avoir révélé tout son potentiel. L'évolution sensible des capteurs au cours des dernières années et la banalisation des techniques de traitement de l'image numérique permettent enfin d'entrevoir des résolutions au sol et des capacités de discrimination spectrale qui jusqu'à présent ont fait défaut au géologue. La course à la conquête spatiale a été remplacée par une saine émulation dans le domaine de l'observation de la terre. Il importe donc d'être très attentifs à ces développements et de mener conjointement avec des études au sol des campagnes de validation et de valorisation des nouveaux outils de télédétection.

A l'instar des systèmes d'information géographiques (S.I.G.) de véritables systèmes d'information géologiques (S.I.Géol.) doivent être mis en œuvre pour recueillir l'ensemble de l'information disponible sur une région et en permettre une meilleure valorisation, tant au bénéfice des communautés (gestion des risques, aménagement du territoire,...) qu'au service de l'initiative privée dûment maîtrisée (indices miniers, impacts environnementaux des exploitations,...). De tels outils de télégestion de l'information géologique, sans cesse mis à jour grâce notamment au réseau Internet, devraient permettre aux pays les plus défavorisés de gérer leurs géoressources et de prévenir les géorisques sans pour autant entretenir de coûteuses équipes d'administration.

Cet article sera illustré par une série d'exemples issus du Sud Lipez bolivien mettant en évidence les potentialités de la télédétection géologique dans les régions de moindre couverture végétale et démontrant les avantages indiscutables d'une gestion cartographique informatisée des archives géologiques.

2. Les nouvelles technologies au service du développement humain.

Le rapport des Nations Unies sur le développement humain publié en 2001 (PNUD, 2001) est passé relativement inaperçu, à tout le moins si on le compare à l'impact médiatique du rapport de 1990 jetant les bases du concept de développement durable. Ce rapport 2001 avait pour sous-titre « Mettre les nouvelles technologies au service du développement humain » stigmatisant par là l'importance des technologies, y compris les plus innovantes, dans la lutte contre la pauvreté.

A première vue, le paysage planétaire révèle une très forte disparité en matière de développement technologique et ce au sein même des régions les plus pauvres du globe. C'est pourquoi, à côté du désormais traditionnel Indice de Développement Humain, le rapport 2001 propose l'introduction d'un Indice de Développement Technologique. Le tableau 1 reprend les principales composantes des indicateurs de développement humain (IDH) et de développement technologique (IDT).

L'importance des technologies de la télécommunication et en particulier les possibilités d'accès au réseau Internet sont perçues comme des facteurs essentiels du développement, permettant aux plus défavorisés d'avoir un accès rapide aux informations pertinentes (météorologie, cours des matières premières,...) de partager l'accès au savoir planétaire et le cas échéant de pouvoir briser les barrières d'importation grâce au commerce électronique : « *L'ère des réseaux peut donner aux personnes les moyens de se réaliser en leur permettant d'utiliser des savoirs qui sont le patrimoine collectif de l'humanité et de contribuer à l'enrichissement de ces savoirs.* » (PNUD, 2001)

Dans ce contexte, l'importance des politiques publiques de stimulation de la recherche, de diffusion des connaissances, de formation supérieure ou encore de gestion des risques technologiques sont autant de facteurs essentiels qu'il importe de ne pas perdre de vue. Elles sont d'autant plus importantes que les seules règles du marché, répondant exclusivement aux besoins exprimés par ceux qui ont un réel pouvoir d'achat, ne peuvent favoriser le développement de technologies bénéficiant aux régions les plus défavorisées. Le tableau 2 situe quelques pays remarquables sur les échelles d'IDH et d'IDT.

Depuis le début de la conquête spatiale, l'intérêt pour les techniques d'Observation de la Terre a été soutenu et une très large gamme d'applications potentielles a été explorée par les équipes scientifiques gravitant autour des agences spatiales. Pendant près de trente ans, on a pu croire que ces techniques resteraient l'apanage de groupes scientifiques extrêmement restreints. Or il apparaît aujourd'hui que les moyens de traitement et d'analyse de l'information sont à la portée de tout utilisateur équipé d'un ordinateur aux performances standard. D'autre part, des images qui initialement étaient coûteuses en raison de leur mode de stockage et de diffusion sont aujourd'hui accessibles via l'Internet pour des sommes modiques. Les principales exceptions étant les images générées par des satellites lancés par des sociétés privées. Il convient cependant de modérer cet enthousiasme en constatant que des opérations militaires récentes (intervention américaine en Irak – mars 2003) ont démontré que cette disponibilité illimitée des documents pouvait être remise en cause sine die dès lors qu'il s'agit de préserver des informations stratégiques ou considérées comme telles.

L'intérêt de la télédétection dans des domaines tels que l'aménagement du territoire, la planification agricole, les opérations humanitaires ou encore la météorologie paraît d'autant plus évident qu'il s'agit d'une gestion dynamique de l'information (analyse de séquences temporelles d'images réalisées sur une même zone). L'intérêt pour la cartographie géologique est en revanche trop souvent sous-estimé. Or, il est manifeste que tant l'augmentation de la résolution spatiale des images que l'augmentation des performances spectrales des capteurs sont de nature à offrir de nouvelles perspectives, sans compter le développement de systèmes imageurs non-optiques potentiellement capables de pénétrer sous le couvert végétal et dans les cas les plus favorables sous de fines couches d'altération ou de dépôts sablonneux (Paillou et al., 2002).

3. L'imagerie numérique du monde minéral

Dans le contexte de l'analyse scientifique du contenu des images, seules celles qui garantissent une corrélation entre la signature spectrale d'un pixel et la nature de la cible correspondante présentent un intérêt potentiel. De telles images ne peuvent être obtenues que moyennant une maîtrise optimale des phénomènes optiques qui régissent la formation de l'image. Contrairement à une idée trop largement répandue, l'avènement d'images numériques n'a en rien contribué à l'amélioration de la qualité intrinsèque des images, mais il est vrai que cette technologie garantit un transfert et un archivage de l'information sans dégradation de la qualité tout en offrant des possibilités illimitées de traitement de l'information.

Quelle que soit l'échelle d'observation, l'acquisition d'images de substances minérales obéit fondamentalement aux mêmes règles. La différence principale réside dans le fait qu'au fur et à mesure que les distances capteur-surface augmentent, l'opérateur perd la faculté de maîtriser complètement l'environnement de prise d'images. Il doit dès lors se contenter d'un lien de plus en plus ténu entre les propriétés de l'image et celles de la cible naturelle.

L'environnement de prise d'image est constitué de trois composantes fondamentales : la source lumineuse, la surface minérale et le capteur. Chacune de ces composantes possède des caractéristiques géométriques et spectrales qu'il importe de connaître avec précision pour calibrer le système.

La source idéale doit offrir un spectre parfaitement stable dans le temps. Celui-ci doit être suffisamment énergétique et étendu pour permettre l'analyse des propriétés optiques de la matière minérale depuis les fluorescences dans l'ultraviolet jusqu'aux bandes d'absorption caractéristiques des plus grandes structures moléculaires dans l'infrarouge.

La géométrie d'éclairement doit être parfaitement connue. Celle-ci devrait être soit parfaitement collimatée (tous les rayons sont parallèles), soit parfaitement diffuse (les rayons se propagent uniformément dans toutes les directions de l'espace).

La surface minérale doit être idéalement plane à l'échelle de la longueur d'onde incidente pour permettre d'accéder aux propriétés de réflectance de la matière tant en mode spéculaire qu'en mode diffus. Cette planéité (Δh) peut être définie selon le critère de Rayleigh (van der Meer, 2001) pour une longueur d'onde donnée (λ) incidente selon l'angle (θ) comme étant :

$$\frac{\Delta h \cdot \cos \theta}{\lambda} < \frac{1}{8}$$

Le capteur idéal doit quant à lui offrir une résolution spatiale permettant d'imager des régions constituées d'un minéral unique, c-à-d d'enregistrer un spectre de réflectance pur plutôt que celui d'un mélange spectral. Ce capteur doit avoir une dynamique et une sensibilité telles qu'elles permettent de discriminer les spectres des espèces minérales présentes dans une même scène. Sa sensibilité spectrale doit couvrir toute la gamme des longueurs d'ondes étudiées. Enfin, si le capteur n'est pas ponctuel mais qu'il est constitué d'une multitude de cellules sensibles (capteurs linéaires ou matriciels) chaque cellule doit pouvoir répondre de manière identique à une même excitation lumineuse.

En pratique, aucun système imageur n'est capable de réunir les conditions idéales définies ci-dessus. Il importe donc d'évaluer toutes les causes de dérive, d'en minimiser les effets et le cas échéant d'appliquer les corrections indispensables.

3.1. Imagerie microscopique des surfaces minérales.

Les minéraux opaques constituant les minerais sont classiquement observés par microscopie en lumière réfléchie. Dans cette configuration, la lumière incidente est collimatée perpendiculairement à la surface minérale et la composante observée est celle qui est réfléchie perpendiculairement en sens opposé (Criddle, 1998). Malgré tout le soin apporté à la fabrication des microscopes modernes, il est impossible d'obtenir une homogénéité d'éclairage sur toute la scène et d'éviter toute aberration chromatique ou géométrique. Cela signifie en pratique qu'il est indispensable de calibrer les images microscopiques en prenant pour référence l'image d'un matériau homogène de réflectance connue et en maintenant toutes les conditions opératoires stables durant le processus d'acquisition des images. Le protocole détaillé d'acquisitions d'images multispectrales en microscopie a été présenté dans Pirard (2004). Le respect de ce protocole garantit que tout minéral, quelque soit son emplacement dans la scène et quelque soit le moment de la prise d'images, générera un pixel de signature spectrale identique. C'est à cette seule condition qu'une reconnaissance automatique des minéraux opaques sur base de leur spectre de réflectance pourra être tentée. La figure 1 illustre la nature de l'information associée à un pixel dans une image multispectrale à quatre bandes prise en microscopie en lumière réfléchie. L'augmentation à terme du nombre de bandes spectrales devrait permettre d'exploiter toute l'information spectroscopique disponible dans les bases de données de microscopie des minéraux opaques (Criddle et Stanley, 1993).

3.2. Imagerie satellitaire optique des surfaces rocheuses.

Contrairement à la microscopie, la télédétection optique doit prendre en compte des facteurs d'environnement qui ne sont ni stables, ni contrôlables par l'opérateur. Il s'agit en particulier de la position du soleil, de son spectre d'émission, de l'altération de celui-ci par l'atmosphère et du caractère ni diffus, ni collimaté du rayonnement solaire. D'autre part, la surface qui reçoit le rayonnement solaire n'est ni plane, ni parfaitement diffusante. Les corrections d'images induites par la complexité de la source et de la surface font l'objet de nombreuses recherches scientifiques qui donnent lieu à autant de modèles de correction.

A cela, il convient d'ajouter que les capteurs sont eux-mêmes sujet à de nombreuses imperfections dues à leur construction (Iwasaki, et al., 2002, phénomène cross-track de ASTER) ou à leur trajectoire de vol (Chris-Proba, 2004).

Dans ce cadre également, l'identification de signatures spectrales dans une image passe par un calibrage au moyen de surfaces aux propriétés spectrales connues. Ces surfaces sont connues par la prospection géologique de terrain ou mieux encore par des mesures spectrales de terrain effectuées au moyen de spectromètres portables (ex. PIMA, Cudahy et Ramanaidou, 1997).

L'identification automatique d'objets géologiques dans des images de télédétection qui seraient parfaitement calibrées reste malgré tout extrêmement délicat étant donné que chaque pixel doit être considéré comme résultant d'un mélange de spectres (minéraux) purs. Ces mélanges sont malheureusement très rarement des combinaisons linéaires de spectres ! (van der Meer, 2001)

4. Les instruments de télédétection géologique

4.1. Bref historique de l'observation de la terre

On distingue habituellement trois grandes générations d'instruments dans l'histoire de l'évolution technologique des satellites d'observation (Scanvic, 1993).

Les capteurs de la première génération (1972-1984) se caractérisent par leur faible résolution spatiale. Les images de ces satellites, ont surtout été utilisées pour mettre en évidence le potentiel de la télédétection géologique.

La seconde génération de satellites (1984-2000) se caractérise par le passage au numérique et une amélioration sensible de la résolution et des capacités radiométriques (extension des possibilités d'imagerie dans l'infrarouge). Les limitations principales de cette époque restent liées à l'imperfection des corrections atmosphériques et au coût des plateformes informatiques de traitement des images. Les satellites SPOT et LANDSAT TM sont caractéristiques de cette génération.

La troisième génération de satellites (2000-...) est marquée par trois grandes tendances: - la construction de satellites de très haute résolution spatiale ($< 1\text{ m}$); - le développement de capteurs hyperspectraux (> 200 bandes spectrales espacées de 10 nm); - l'avènement de sociétés privées dans le secteur de l'observation de la terre.

Cette dernière tendance est contrôlée par une directive présidentielle américaine qui confie au US Department of Commerce l'octroi des licences pour la construction de satellites à usage commercial. Ceci se traduit par une série de restrictions technologiques imposées aux sociétés qui désirent se lancer dans l'aventure spatiale, permettant ainsi au gouvernement américain de se ménager une avance. Depuis quelques années, il convient de remarquer que la diffusion des images vers un plus grand nombre d'utilisateurs potentiels a largement réduit le coût de l'information spatiale.

La quatrième génération devrait commencer avec l'apparition de la technologie SSS ou *Small Satellite Systems*, c-à-d une véritable constellation de microsatsellites qui devrait permettre de réduire de moitié les coûts de production et d'opération tout en embarquant des capteurs de plus en plus intelligents et autonomes.

4.2. Classification des différents types de satellites

Il est courant de classer les systèmes d'observation en fonction des couvertures spectrales suivantes (Spatz, 1999) :

- VNIR : Visible et proche infrarouge (de $0,3\text{ }\mu\text{m}$ à $1\text{ }\mu\text{m}$)
- SWIR : Infrarouge moyen ($1\text{ }\mu\text{m}$ à $2,5\text{ }\mu\text{m}$)
- TIR : Infrarouge thermique ($3\text{ }\mu\text{m}$ à $5\text{ }\mu\text{m}$ et de $8\text{ }\mu\text{m}$ à $12\text{ }\mu\text{m}$)
- Radar : micro-ondes de $2,5\text{ cm}$ à $3,8\text{ cm}$ (Bande X) ; de 4 cm à $7,5\text{ cm}$ (Bande C) ; de 15 cm à 30 cm (Bande L), etc.

Il est également possible de classer les satellites en fonction de la technologie de prise d'images : soit un photomètre ponctuel (whiskbroom) ; soit une barette CCD (pushbroom) ; soit un capteur CCD matriciel (staring imager).

Une classification probablement plus utile pour les géologues est celle qui les regroupe en fonction de leur domaine d'application (Nicke et al. 1997) et des caractéristiques techniques des images (résolution au sol, résolution spectrale, champ de vision,...). Ceci conduit généralement aux quatre groupes suivants :

1. Les capteurs à large couverture globale, capables de fournir une image complète du globe en 2 à 5 jours. Ces capteurs possèdent une haute résolution spectrale mais une résolution spatiale relativement faible. Ils sont utilisés pour la cartographie de surfaces très vastes telles que les océans. Ils ne présentent qu'un intérêt très limité pour la géologie. Dans cette catégorie, on retrouve des instruments tels qu'AVHRR, MODIS, etc.
2. Les capteurs à couverture globale intermédiaire, qui fournissent une image complète du globe tous les 16 jours, tout en offrant une capacité de prise d'image à incidence oblique, permettant le cas échéant un large recouvrement de surface entre deux révolutions. La caractéristique de ces systèmes est qu'ils offrent une bonne résolution au sol (10 à 50 m) ainsi que des capacités multispectrales (une dizaine de bandes). La majorité des applications géologiques ont été développées avec ces instruments qui permettent une discrimination raisonnable des principales formations géologiques. On retrouve dans cette catégorie les satellites Landsat, HRVIR, ETM+, etc.
3. Les systèmes à très haute résolution spatiale (1 à 5 m) mais faible largeur de champ. Ces satellites ont la capacité de prendre au besoin des vues obliques. Ils n'assurent pas de couverture globale de la terre dans des délais raisonnables. Cette technologie trouve un large champ d'applications en géologie dans le domaine de la prévention des risques naturels (surveillance des volcans, glissements de terrain, inondations,...). Parmi les systèmes de cette catégorie, on retrouve OrbView-3, Quickbird, Ikonos, etc.
4. Les capteurs hyperspectraux (200 bandes) tels que Hyperion embarqué dans la mission EO-1 lancée en Nov. 2000. Ces capteurs sont l'avenir de la télédétection géologique car ils offrent une capacité de

discrimination minéralogique beaucoup plus grande que les systèmes multispectraux. Ils sont actuellement testés à des fins scientifiques et expérimentales. Parmi les systèmes annoncés à court terme figurent ARIES et APEX.

Un dernier mode de classement des satellites conduit à trois grands groupes. Il revient à spécifier le nombre de canaux, la largeur du champ et la résolution spatiale (figure 2).

4.3. Les satellites multispectraux conventionnels

La majeure partie des programmes d'observation terrestre multispectraux ont débuté de manière expérimentale. Ils ont apporté de nombreuses innovations et contribué à une politique d'utilisation des images qui peut être résumée comme suit (Gupta, 2003) :

- les données produites sont accessibles à tous sans restriction sécuritaire.
- la couverture du globe est complète et systématique
- les limites des bandes sont sélectionnées en fonction des caractéristiques spectrales des objets géologiques (roches et minéraux) et de la transmission atmosphérique.

Le tableau 3 reprend les caractéristiques des principaux satellites multispectraux conventionnels.

Il serait trop ambitieux de vouloir présenter ici une synthèse des caractéristiques de chacun de ces satellites, aussi mettront nous l'accent sur le capteur qui offre actuellement les potentialités les plus larges pour les applications à caractère géologique : ASTER

Le système ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection) a été construit conjointement par la NASA et le Ministère Japonais de l'Industrie (MITI). Il est l'un des cinq capteurs embarqués sur le satellite EOS-AM1 (Terra) lancé en décembre 1999.

Le satellite est placé sur une orbite quasi polaire, quasi circulaire et héliosynchrone qui présente une inclinaison de 98,2°. Il est à une altitude de 705 km de la terre ce qui lui confère un cycle de répétition de 16 jours.

Le capteur contient en réalité trois sous-systèmes : le premier couvre le VNIR (0,52 μm -0,86 μm) en trois bandes distinctes et offre une résolution de 15 m au sol, le second couvre le SWIR (1,6 μm -2,43 μm) en six bandes de résolution au sol égale à 30m et le dernier fournit une couverture en cinq bandes de l'infrarouge thermique (TIR : 8,12 μm -11,65 μm) avec une résolution au sol de 90m.

4.4. Les satellites d'observation à haute résolution spatiale.

La mise à disposition d'images à haute résolution spatiale (< 5m) est une évolution récente du marché de la télédétection qui a été stimulée initialement par une volonté du gouvernement russe rapidement suivie par une décision américaine d'ouvrir le marché de l'observation par satellite à des sociétés privées tout en tolérant une résolution minimale de 0,5m au sol ! (Petrie, 2001). Cette technologie rivalise actuellement avec la photographie aérienne classique tout en offrant un accès beaucoup plus rapide aux différentes régions du globe.

Le tableau 4 reprend la liste des principaux capteurs à haute résolution actuellement en fonction. Ces capteurs ont des capacités spectrales très limitées, offrant généralement une bande panchromatique et trois bandes couleur (VNIR). Leur utilisation majeure concerne l'aménagement du territoire. Ils peuvent en ce sens être utiles dans la prévention des catastrophes naturelles (inondations, glissements de terrain, etc.). D'autres satellites à haute résolution sont annoncés pour 2004 : le satellite indien Cartosat-1 (IRS-P5), le satellite ALOS japonais et le satellite EROS B1 de la compagnie ImageSat. Les premiers auront une résolution de 2,5m, le dernier est annoncé avec une résolution de 0,8m.

4.5. La télédétection hyperspectrale aéro et spatioportée

Les systèmes hyperspectraux (plusieurs dizaines de canaux couvrant le spectre VNIR-SWIR) ont une longue histoire dans le domaine militaire. Leur potentiel pour des applications civiles et en particulier géologiques n'est plus à démontrer depuis l'apparition du système aéroporté AVIRIS développé par la NASA.

Les systèmes hyperspectraux aérotransportés peuvent être classés selon Nicke et al. (1997) en deux grands groupes :

1. Les capteurs utilisés à des fins environnementales qui proposent une très large champ de vision (angle de vision supérieur à 70°)
2. Les capteurs scientifiques et les simulateurs des futurs systèmes embarqués sur satellite qui utilisent un angle de vue inférieur à 70°.

Grâce à leur résolution spectrale de l'ordre de 10nm, ces systèmes permettent de développer une véritable spectrophotométrie imageante de la surface du globe. Ils éveillent un intérêt particulier en exploration minière, pétrolière et en cartographie géologique à distance. Malheureusement leur coût opératoire fait en sorte que leur usage reste encore très limité. Les systèmes les plus connus sont présentés dans le tableau 5.

La mise sur orbite de capteurs hyperspectraux a débuté par deux malheureux échecs de lancement (LEWIS en 1997 et OrbView en 2001). Le premier lancement réussi est celui d'Hyperion qui est actuellement en phase de validation sur des régions d'Australie, d'Argentine et des Etats-Unis (Ungar, et al 2003). Le tableau 6 présente la liste des principaux capteurs hyperspectraux en opération ou en phase de construction. Les systèmes présentés dans le tableau 7 font partie de la même famille de capteurs, mais ils sont encore au stade de précurseurs (simulateurs) des systèmes qui seront réellement embarqués dans de futures missions spatiales.

5. Télédétection et télégestion d'informations géologiques dans le Sud Lipez (Bolivie)

La région du Sud Lipez étudiée dans le cadre de cette étude couvre les 5163 km² de la Cordillère des Andes boliviennes situés à la frontière avec l'Argentine. L'exploration géologique de cette région n'a débuté que dans les années 90, conduisant rapidement à l'identification de minéralisations importantes liées aux complexes volcaniques néogène-quadernien.

En raison de l'aridité du climat et de la variété des lithologies présentes, cette région offre des potentialités exceptionnelles pour la télédétection. Le travail ci-après exploite les images Landsat TM, les données aéromagnétiques, la géologie régionale et quelques observations de terrain.

5.1. Géologie du Sud-Lipez

La région du Sud Lipez se trouve dans la zone volcanique centrale (Francis et Hawkesworth, 1994). Elle résulte d'une succession de phases tectoniques et pluto-volcaniques espacées par de courtes périodes de sédimentations détritiques d'origine marine et continentale.

De manière générale, la région est couverte de roches volcaniques et sédimentaires qui vont du Néogène au présent et elle se caractérise par la prédominance de failles actives limitées par des poussées endogènes (Baby et al, 1997 ; Kley, 1999).

La séquence stratigraphique de la zone étudiée commence par une série de turbidites du Llanvirnien - Caradocien Inférieur déposées dans un environnement marin en contexte de subsidence rapide (figure 3). Ces roches se sont formées durant la phase tectonique synsédimentaire Oclloyca (Ordovicien Supérieur) et furent déformées et métamorphisées durant l'orogénèse Hercynienne (Devonien Supérieur- Carbonifère Inférieur). Par-dessus la séquence Ordovicienne reposent en discordance angulaire des dépôts marins superficiels du Crétacé Supérieur ainsi qu'une séquence Cénozoïque composée de roches sédimentaires et volcaniques. La série Cénozoïque (Paléocène-Oligocène supérieur) est d'origine fluviale, lacustre et fluvio-lacustre. Elle s'est déposée dans un bassin intramontagneux d'avant-pays (Baby, et al. 1990).

L'activité volcanique intense en relation avec la subduction de la plaque de Nazca s'exprime par d'abondantes intercalations de volcanisme alcalin dans la séquence sédimentaire Cénozoïque. Cette activité commence par l'événement volcanique Roldan (22.9±0.9 Ma (K/Ar), Kussmaul, et al., 1975) et est à mettre en relation avec quatre centres volcaniques majeurs : le Lipez (en activité entre 16 et 6 Ma), le Khastor (7.6 Ma), le Lozada et le Panizos. Ce dernier est une caldera de type "charnière" de plus de 2000 km² et son activité s'étend de 7.8 Ma à 6.5 Ma (Ort, 1993). Dans la même zone, on distingue quatre corps subvolcaniques porphyriques majeurs (Stock Guadalupe, Iskhay Orkho, Morokho et Nuevo Mundo) qui sont étroitement liés aux gisements métalliques (Cu, Sn, Ag,...) existants dans la région (figure 3).

Les failles inverses de direction N-S à NE-SO sont apparues lors de la phase Incaïque (Oligocène Supérieur-Miocène Inférieur). Elles sont caractéristiques d'un mouvement de décrochement sénestre (Baby, et al., 1990) associé à la présence de plis d'amplitude kilométrique, d'axe subhorizontal et de plan axial subvertical. L'activité magmatique de la zone est associée à des mouvements de décrochement combinés à une compression ou une extension crustale selon les cas. Les premiers ont généré des plis de direction NNE-SSO et NO-SE dans des roches éocènes à miocènes ; les seconds ont généré une fracturation latérale dans les niveaux crustaux supérieurs, permettant ainsi le développement de l'activité volcanique du Miocène. Ces efforts ont également généré des fractures radiales à sub-radiales (caldera du Panizos) et des failles normales (Garcia, 1997).

Des plis symétriques affectés par des failles à pendage faible se rencontrent dans la partie occidentale de la zone étudiée et sont associés à de efforts des transpression et de transtension (phase Quechua – Miocène Supérieur) en relation avec des failles corticales et des venues magmatiques du Miocène (Choque et Mamani, 1997).

La région s'inscrit dans la ceinture polymétallique à Ag-Pb-Zn-Cu-Au de l'Altiplano (Heuschmidt et Miranda, 1998). Au sein de celle-ci on peut distinguer deux grands types de gisements : les gisements filoniens polymétalliques du type bolivien (Ludington et al., 1992) et les gisements épithermaux (Erickson et Cunningham, 1994). Les gisements filoniens sont associés à des intrusions méso à épizonales. Ils se présentent généralement sous la forme de filons et de stockwerks contenant des paragenèses à wolframite, cassitérite, arsénopyrite, bismuth,

sphalérite, pyrite, pyrrothine, chalcopryrite, stannite, galène et sulfosels argentifères. Les sites minéralisés les plus connus sont Bonete, Morokho, San Antonio, Jaquagua et Santa Isabel. Les gisements épithermaux auro-argentifères sont associés à des complexes volcaniques Néogènes ou Quaternaires et peuvent se subdiviser en deux groupes : les sulfato-acides et les séricite-adulaire. Ces derniers dominent largement la région étudiée et se rencontrent principalement dans le district de Buena Vista. Ils se caractérisent par la présence de filons, de stockwerks, de brèches et d'imprégnations polymétalliques riches en argent. Les paragenèses principales font apparaître la tétraédrite, la pyrargirite, la galène, l'or natif (électrum), la bornite, la pyrite, la sphalérite, la chalcopryrite, etc. Enfin, de nombreux petits placers aurifères se rencontrent dans la zone (Hérail et al., 1993). Ils correspondent à des concentrations alluvionnaires dans des niveaux de terrasses de cours d'eau relativement importants (San Juan del Oro, Guadalupe, San Pablo, Marte) ou à des cônes de déjection formés aux pieds des affluents. Ils peuvent également être de nature éluvionnaire. Les auteurs distinguent différents gisements primaires potentiels (Ramos et Fornari, 1994 ; Hérail et al., 1993) : filons de quartz dans les terrains Ordoviciens (Vilader) ou or épithermal (Guadalupe) et or associé à la fracturation et à l'altération des roches volcaniques.

5.2. Acquisition et traitement des données.

Toutes les données utilisées dans ce travail sont disponibles commercialement ou dans la littérature scientifique. Qu'il s'agisse de cartographie géologique, de données géochimiques, de localisation des indices minéralisés ou encore de géophysique aérotransportée, l'ensemble des données disponibles fut intégré dans un système d'informations géographiques unique (ArcGIS). Cet outil logiciel a permis de développer une large base de données géologique du Lipez et a servi au traitement ainsi qu'à l'analyse de l'information.

Les données compilées sont les suivantes :

1. Carte géologique au 1/250.000 de la zone Volcan Juriquez – Co. Zapaleri. Publiée par le Service Géologique bolivien (Sergeomin) et disponible sous forme digitale en format MicroStation.
2. Relevé aéromagnétique de 25.106 km² couvrant la Cordillère Occidentale et l'Altiplano. Données issues de la campagne GeoBol – BGM Airborne Surveys de 1991 et disponibles sous format SEG BD à 1600 bdi.
3. Image Landsat TM5 (LT52330740008703110) du 31 janvier 1987 à 13h50 disponible en format NDF avec une résolution de 28,5 m
4. Cartes géologiques imprimées à l'échelle 1/100.000. Feuilles Laguna Corante – Picalto(6227) ; San Pablo de Lipez (6228) et Esmoraca (6328).
5. Base de données des ressources minérales (Mineral Resource Data System-SERGEOMIN)
6. Base de données de la carte géologique San Pablo de Lipez – 6228. Publiée par le Service Géologique bolivien.

L'intégration de l'ensemble des données dans un système SIG unique suppose une série de prétraitements et de conversions de format qui peuvent se révéler fastidieux. La géoréférenciation unique de tous les documents révèle des disparités et des discordances significatives qui sont principalement dues à l'évolution technologique des systèmes de mesures géodésiques. Seules les données les plus récentes ont été localisées par un système de GPS. A défaut de mieux, les informations topographiques de la carte géologique au 1/250.000 ont servi de base à la construction du modèle numérique de terrain de la région étudiée.

Les documents imprimés ont été digitalisés en suivant le protocole suivant :

- les documents sont numérisés sous format TIF par un scanner.
- L'ensemble des documents TIF sont mosaïqués pour obtenir un document unique.
- Les indications du fond topographique sont isolées de l'information géologique (formations en couleur) par traitement d'images.
- Les images sont géoréférencées et le cas échéant anamorphosées pour respecter des indications géodésiques connues.
- Les délimitations des formations géologiques sont extraites par un algorithme de vectorisation des contours.
- Le document vectorisé est édité manuellement pour éliminer des artefacts éventuels.
- Les attributs géologiques sont associés dans une base de données aux contours vectorisés des formations.

5.3. Analyse des données

Nous nous contentons ici d'abord l'analyse des données de télédétection uniquement. L'analyse conjointe des données géophysiques et géochimiques devrait faire l'objet d'une publication ultérieure.

5.3.1. Analyse spectrale

Des échantillons de roche ont été prélevés dans des régions considérées comme anormales au regard des images satellitaires. Il s'agit principalement de zones d'altération hydrothermales. Au total, neuf échantillons représentatifs chacun d'un pixel de l'image ont été retenus. Afin d'affiner l'analyse des spectres, les mesures spectrophotométriques ont été répétées deux fois sur chaque échantillon en comparant le spectre de la surface altérée et celui d'une cassure fraîche. La figure 4, illustre la comparaison entre deux spectres ainsi obtenus. On remarque que les pics se correspondent très bien en position et que la différence principale entre les spectres réside dans le plus contraste présenté par le spectre altéré. Ceci peut être dû à plusieurs facteurs dont la rugosité de surface, l'humidité, etc. (Clark, 1999). L'analyse des spectres s'est faite au moyen du logiciel ENVI qui procède à une comparaison automatique des spectres de terrain avec ceux présents dans une base de données. La base de données utilisée comme référence dans le cadre de notre étude est celle du Service Géologique Américain (USGS). Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.

Les résultats confirment les observations réalisées sur le terrain et permettent de mieux connaître les minéraux d'altération réellement présents. L'analyse chimique ou minéralogique traditionnelle n'a pas été réalisée, mais elle permettrait de confirmer le cas échéant les résultats de l'analyse spectrophotométrique.

5.3.2. Analyse statistique des canaux

Pour identifier la combinaison de canaux qui offre une information optimale, on peut recourir au calcul de l'Optimum Index Factor (Chavez, et al., 1982) qui utilise la matrice de corrélation spectrale. Pour la scène considérée, il s'avère que les canaux 2,5 et 7 offrent la plus large palette de contrastes. C'est par combinaison de ces canaux que l'on peut identifier les zones d'altération hydrothermale ainsi que les principales caractéristiques géologiques et structurales. En superposition sur le modèle numérique de terrain obtenu au départ des données topographiques, cela constitue un excellent outil d'analyse des relations spatiales entre les différentes structures géologiques. (figure 6)

Par ailleurs, le rapport des canaux 3 et 1 (figure 7) a été utilisé pour mettre en évidence les oxydes de fer et les argiles en sélectionnant les pixels supérieurs à 150. Ce procédé classique de la télédétection géologique (Sabins, 1999) a permis d'identifier des concentrations élevées en oxydes de fer secondaires associées aux régions de Bonete, Mesa de Plata et à quelques autres minéralisations remarquables. Il existe par ailleurs quelques concentrations ferrugineuses liées à des niveaux volcaniques ou sédimentaires. Ces anomalies sont nettement moins présentes dans la partie nord de la région étudiée.

L'histogramme du rapport des images 7 et 5 (figure 8) et plus particulièrement l'image des pixels supérieurs à 145 souligne la présence de zones altérées par l'action hydrothermale et particulièrement riches en hydroxydes. Il peut s'agir de concentrations anormales en alunite en argiles ou dans une moindre mesure en pyroxènes et carbonates (Sabins, 1999).

Les images des trois premières composantes principales obtenues par combinaison linéaire des 6 canaux mettent en évidence les variations spectrales des différentes natures de roches et soulignent mieux encore la présence de zones d'altérations hydrothermales.

5.3.3. Classification des images

Les différentes zones d'altération révélées par l'analyse spectrale et confirmées par l'observation de terrain ont été utilisées comme base d'entraînement pour une classification des pixels par la méthode du maximum de vraisemblance. La figure 9 illustre cette classification qui révèle la similitude de chaque pixel avec l'un des types d'altération identifié dans l'étude spectrale. Ceci permet de délimiter assez nettement les zones de séricitisation et de chloritisation et de confirmer les résultats précédemment obtenus. Il en résulte clairement que les zones d'altération sont étroitement liées à la présence de stockwerks et de certaines lithologies volcaniques. En revanche, la cartographie des oxydes de fer ne montre pas une corrélation parfaite avec les résultats obtenus par le rapport des canaux 3 et 1.

6. Conclusions et perspectives

L'utilisation de nouvelles technologies comme les systèmes d'information géologiques et la télédétection constitue pour la coopération scientifique universitaire un triple défi : celui de l'innovation, celui de la diffusion et celui de la formation. Il est manifeste que la géologie moderne doit participer activement au processus d'innovation si elle veut pouvoir tirer tout le bénéfice possible des technologies qui sont développées. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine spatial où l'on constate encore trop souvent que des capteurs sont mis sur orbite sans qu'un dialogue approfondi n'ait été amorcé avec les différentes communautés d'utilisateurs. Si les géologues souhaitent pouvoir bénéficier demain des technologies optimales en matière de cartographie des roches, de prévention des risques ou encore de gestion des ressources hydriques, il est impératif qu'ils s'associent plus étroitement aux initiatives prises dans le domaine spatial. Le programme hyperspectral belgo-suisse APEX est un exemple parmi d'autres d'initiatives au sein desquelles les géologues doivent être actifs. Le défi de la diffusion de l'information est d'un autre ordre, car il est du ressort de stratégies politiques plus que scientifiques. Il est fondamental que l'essentiel des images produites par les satellites d'observation de la terre reste du domaine public et puisse être utilisé au moindre coût par des équipes de recherche dans les pays les plus défavorisés. A ce titre, il est remarquable de noter que l'Association des Universités Francophones (AUF) a choisi la télédétection comme un domaine prioritaire de coopération entre le Nord et le Sud. C'est grâce à ce type de coopération que le dernier défi pourra également être relevé : celui de la formation. La complexité des outils de gestion et de traitement de l'information spatiale nécessite la formation de scientifiques et d'ingénieurs hautement qualifiés. Si l'on veut permettre aux pays du Sud de développer une gestion des géoressources et des géorisques de manière autonome, il est indispensable de leur permettre de perfectionner la formation de leurs ressortissants, que ce soit au travers de bourses de maîtrises et de doctorats ou encore au travers de la mobilité des formateurs.

4. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Commissariat Général aux Relations Internationales de la Communauté Française de Belgique (CGRI). Grâce au soutien qu'il apporte au projet de création d'un centre de télédétection à Oruro en Bolivie, des initiatives concrètes de formation et de diffusion des connaissances ont pu voir le jour.

5. Bibliographie

- Baby, P. Rochat, P. Mascle, G. et Hérail, G.**, 1997, Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes, *Geology*, 25: 883 – 886.
- Baby, P. Sempere, T. Oller, J. Barrios, L. Hérail, G. et Marocco, R.**, 1990, Un bassin en compression d'âge oligo-miocène dans le sud de l'Altiplano bolivien, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie II*, t 311: 341 – 347.
- Chavez, P. S. Jr., Berlin, G. L. et Sowers, L. B.**, 1982, Statistical method for selecting Landsat MSS ratios, *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8 (1): 23 – 30.
- Chris – Proba**, 2004, <http://www.chris-proba.org.uk/>
- Choque, N. et Mamani, H.**, 1997, Hoja San Pablo de Lipez, 6228, Carta Geológica de Bolivia, Esc. 1:100.000, SGM Serie I-CGB-52, Servicio Nacional de Geología y Minería de Bolivia.
- Clark, R. N.**, 1999, Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences* (eds.) A. N. Rencz, John Wiley and Sons, Inc. New York, USA, 3 – 58.
- Criddle A. J.**, 1998, Ore microscopy and photometry ((1890-1998), in *Modern approaches to ore and environmental mineralogy*, Cabri L.J. and Vaughan D.J. Eds, Mineralogical Association of Canada - Short Course Series – V.27, Ottawa
- Criddle A.J. et Stanley C.J.**, 1993, *Quantitative Data File for Ore Minerals*, 3rd Ed., Chapman & Hall, London, UK, 635 pp.
- Cudahy, T.J. et Ramanaidou, E.R.** Measurement of the hematite:goethite ratio using field visible and near-infrared reflectance spectrometry in channel iron ore deposits, Western Australia. *Aust. J. Earth Sci.*, 1997, 44, 411-420.
- Eriksen, G. et Cunningham, C.**, 1994, Depósitos metalíferos asociados a los centros volcánicos neogenos-cuaternarios en los Andes Centrales, *Comunicaciones*, 45: 81 – 86.
- Francis, P. W. et Hawkesworth, C. J.**, 1994, Late Cenozoic rates of magmatic activity in the Central Andes and their relationships to continental crust formation and thickening, *Journal of the Geological Society*, 151: 845 – 854.
- Garcia, R.**, 1997, Hoja Laguna Corante/Picalto, 6227 – 6327, Carta Geológica de Bolivia, Esc. 1:100.000, SGM Serie I-CGB-42, Servicio Nacional de Geología y Minería de Bolivia.
- Gupta, R. P.**, 2003, *Remote Sensing Geology*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2d ed., 75-121.

- Hérail, G. Fornari, M. et Pozzo, I. L.**, 1993, Emission d'or particulaire au cours des phases de volcanisme explosif de Miocène du Sud de l'Altiplano de Bolivie, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie II*, 316: 1431 – 1438.
- Heuschmidt, B. et Miranda, V.**, 1998, Memoria explicativa, Mapa Metalogenico de Bolivia, Esc. 1:1.000.000, SERGEOMIN: 50p.
- Iwasaki, A. Fujisada, H. Asao, H. Shindou, O. et Akagi, S.**, 2002, Enhancement of spectral separation Performance for ASTER/SWIR, *Infrared Spaceborne Remote Sensing IX*, Proceedings SPIE Vol: 4486, Paper-No. 4486-06: 42 – 50.
- Kley, J.**, 1999, Geologic and geometric constraints on a kinematic model of the Bolivian Orocline, *Journal of South American Earth Sciences*, 1999, 12: 221-235.
- Kussmaul, S. Jordan, L. et Ploskonka, E.**, 1975, Isotopic ages of tertiary volcanic rocks of SW Bolivia, *Geologische Jahrbuch*, B14: 111 – 120.
- Ludington, S. Orris, G. L. Cox, D. P. Long, K. R. et Asher-Bolinder, S.**, 1992, Mineral deposits models, in USGS – GEOBOL, *Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia*, USGS Bulletin, 1975: 63 – 89.
- Nicke, J. Schwarzer, H. Neumann, A. et Zimmermann, G.**, 1997, Imaging spaceborne and airborne sensor systems in the beginning of the next century, the European Symposium on Aerospace Remote Sensing (IEE), 22-26 Sept. 1997, London, UK; Conference on Sensors, Systems and Next Generation Satellite III, Proceedings SPIE, Vol: 3221, Paper-No.: 3221-71.
- Ort, M.**, 1993, Eruptive processes and caldera formation in a nested downsang-collapse caldera: Cerro Panizos, Central Andes mountains, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56: 221 – 252.
- Paillou P., Grandjean G., Baghadi N., Heggy E. et August-Bernex T., Achache J.**, 2003, Subsurface imaging in south-central Egypt using low-frequency radar: Bir Safsaf revisited., *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1672-1684.
- Petrie, G.**, 2001, Commercial high resolution space imagery, a very long gestation and a trouble birth!, *Geoinformatics*, 4: 12-17.
- Pirard, E.**, 2004, Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy: *Mineralogical Magazine*, v. 68, p. 323-333.
- PNUD (Collectif)**, 2001, Rapport Mondial sur le développement humain « Mettre les nouvelles technologies au service du développement humain », De Boeck & Larcier, Bruxelles, 264 pp.
- Ramos, W. et Fornari, M.**, 1994, Problemática de la presencia de oro en los Lipez, *Memorias XI Congreso Geológico de Bolivia – Santa Cruz*: 248 – 259.
- Sabins, F. F.**, 1999, Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews*, 14: 157 – 183.
- Scanvic, J. Y.**, 1993, Télédétection aérospatiale et informations géologiques, Orleans, Ediciones BRGM, 200p
- Spatz, D. M.**, 1999, Remote Sensing characteristics of sediment-hosted stratiform copper deposits, Thirteen International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, British Columbia, Canada, 1- 3 March, I-214 – I-221.
- USGS**, 2004, <http://speclab.cr.usgs.gov/>
- Ungar, S. G., Pearlman, J. S., Mendenhall, J. A. et Reuter, D.**, 2003, Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (6): 1149 – 1159.
- Van der Meer F.**, 2001, Chapter 1: Basic physics of spectrometry, in *Imaging Spectrometry, Basic principles and prospective applications* (eds.) F. D. van der Meer and S. M. de Jong, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 3-16.

Tableau 4. Les principaux capteurs à haute résolution opérationnels.

Senseur	Constructeur	Couverture Spectrale (nm)	Nombre de canaux ²	Résolution au sol(m)	Largeur de scène (km)	Prix ³ (\$/image)
Ikonos	SpaceImaging	450 – 880	5	1, 4	11	> 4000
QuickBird	DigitalGlobe	450 - 890	5	0.61, 2.5	16.5	6120 - 6800
OrbView -3	OrbImage	450 - 900	5	1, 4	8	
SPIN – 2 ¹	TerraServer	510 – 760	2	2, 10	160	
EROS – A1	ImageSat International	500 - 900	1	1.8	12.5	1500- 3000
SPOT - 5	CNES/ING	490 – 1750	5	5, 10	60	6400 – 10700
¹ système à deux bandes panchromatiques. ² y compris le panchromatique. ³ selon le niveau de prétraitement de l'image.						

Tableau 5. Liste des principaux capteurs hyperspectraux aéroportés.

Senseur	Constructeur	Couverture spectrale (nm)	Résolution Spectrale (nm)	Nombre de canaux.
AVIRIS Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer	NASA, JPL	400-2450	< 10	224
CASI –2 Compact Airborne Spectrographic Imagen	Itres Research	430-1000	1.9	288
SASI Shortwave Infrared Airborne Spectrographic Sensor	Itres Research	850 - 2450	10	160
DAIS 7915 Digital Airborne Imaging Spectrometer	GER Corp.	400-12000	15-40	79
GERIS Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer	GER Corp.	400-2500		63
HyMap Hyperspectral Mapping	Intspec	450 - 2480	16	126
ROSIS Reflective Optics System Imaging Spectrometer	Dornier Satellite System	430 - 850	7.6	128
ARES Airborne Reflective Emissive Spectrometer	Intspec	470 – 2420 8000 - 12000	15 150	126 32

Tableau 6 Liste des principaux capteurs hyperspectraux satellitaires en opération ou programmés dans un proche avenir.

Senseur	Satellite	Couverture spectrale (nm)	Nombre de canaux.	Résolution spatiale (m)	Largeur de scène (Km)	Etat
Hyperion	EO – 1 Earth Observation	400 - 2500	220	30	7.5	En opération
COIS Hyperspectral Coastal Ocean Imaging Spectrometer	NEMO Naval EarthMap Observer	400 - 2500	210	30, 60	30	En construction
CHRIS Compact High Resolution Imaging Spectrometer	PROBA Project for On-Board Autonomy	450 - 1050	81	25	19	En opération
Canadian Imager	ISS	400 - 2450		30	15	En construction
PRISM Processes Research by an Imaging Space Mission	ESA LSPIM Land-Surface Processes and Interaction Mission	450 - 2350	144	50	50	A l'essai
ARIES Australian Resources Information and Environmental Satellite		450 - 2450	105 - 128	30	15.4	A l'essai

Tableau 7 Liste des principaux précurseurs de capteurs hyperspectraux embarqués dans de futures missions spatiales.

Senseur	Configuration	Couverture Spectrale	Nombre de canaux	Resolution au sol (m)	Largeur de scène (Km)
MAS MODIS Airborne Simulator	MODIS Moderate-Resolution Imaging Spectrometer	550 – 14300	50	50 (à 20 km d'altitude)	36
MASTER MODIS/ASTER Airborne Simulator	ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection	400 - 13000	50	12 -50	
APEX ¹ Airborne Prism Experiment	ESA – PRISM Processes Research by an Imaging Space Mission	380 - 2500	300	2 (à 4 km d'altitude)	2.5 - 5
¹ Consortium Belgo –Suisse					

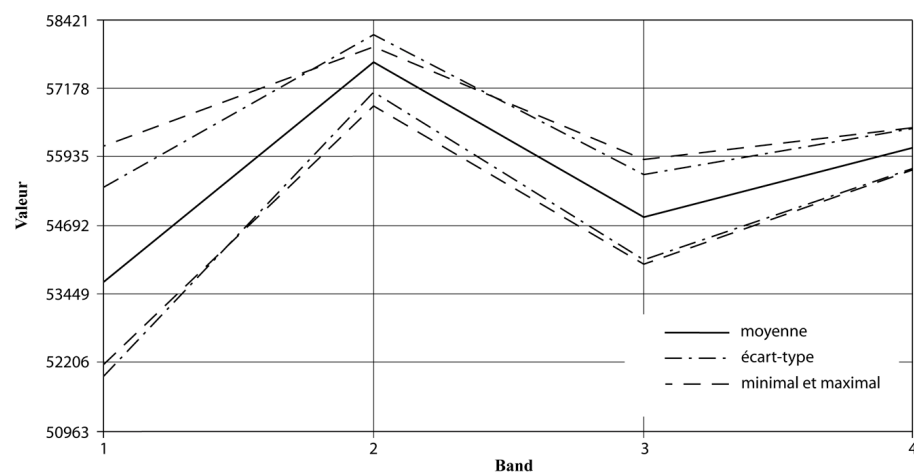
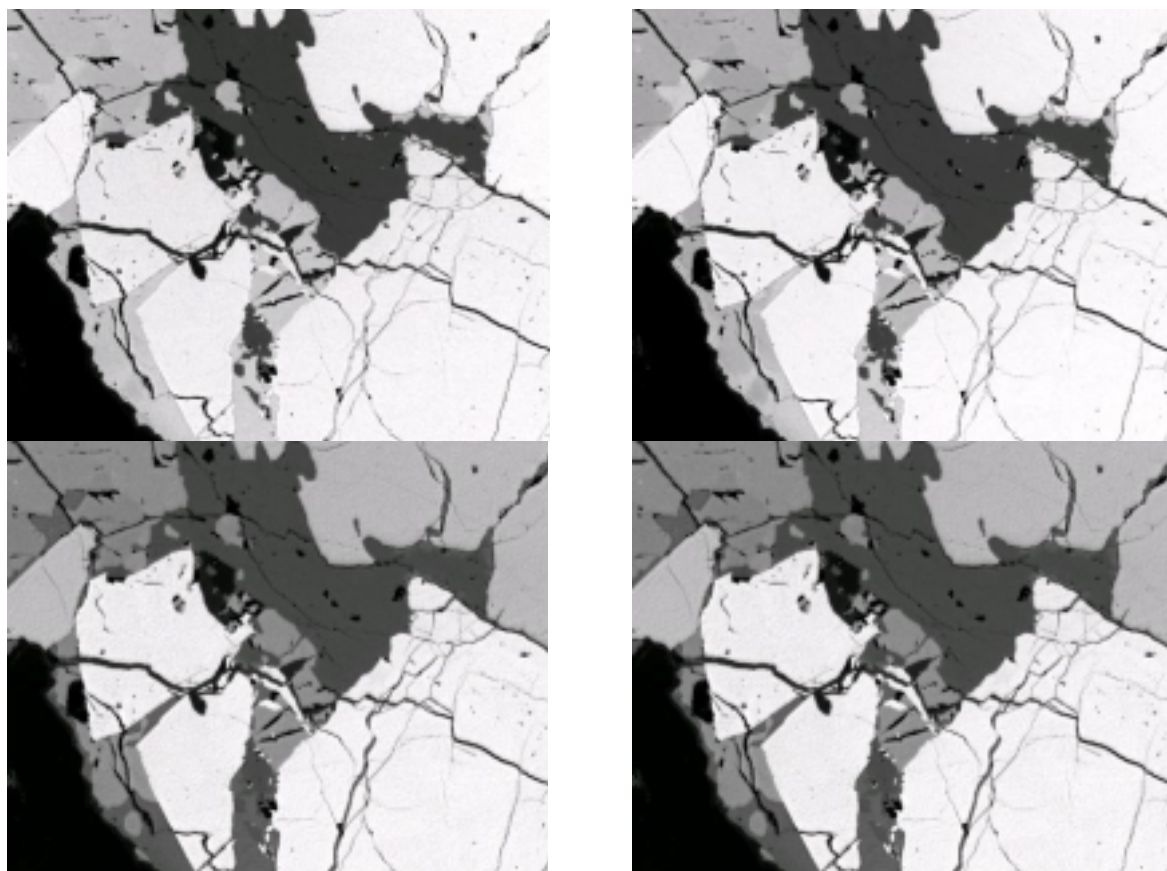


Figure 1: Statistiques d'intensités associées à une sélection de 20 x 20 pixels dans une image multispectrale à quatre bandes (438nm ; 489nm ; 591nm ; 692nm) prise en microscopie en lumière réfléchie.

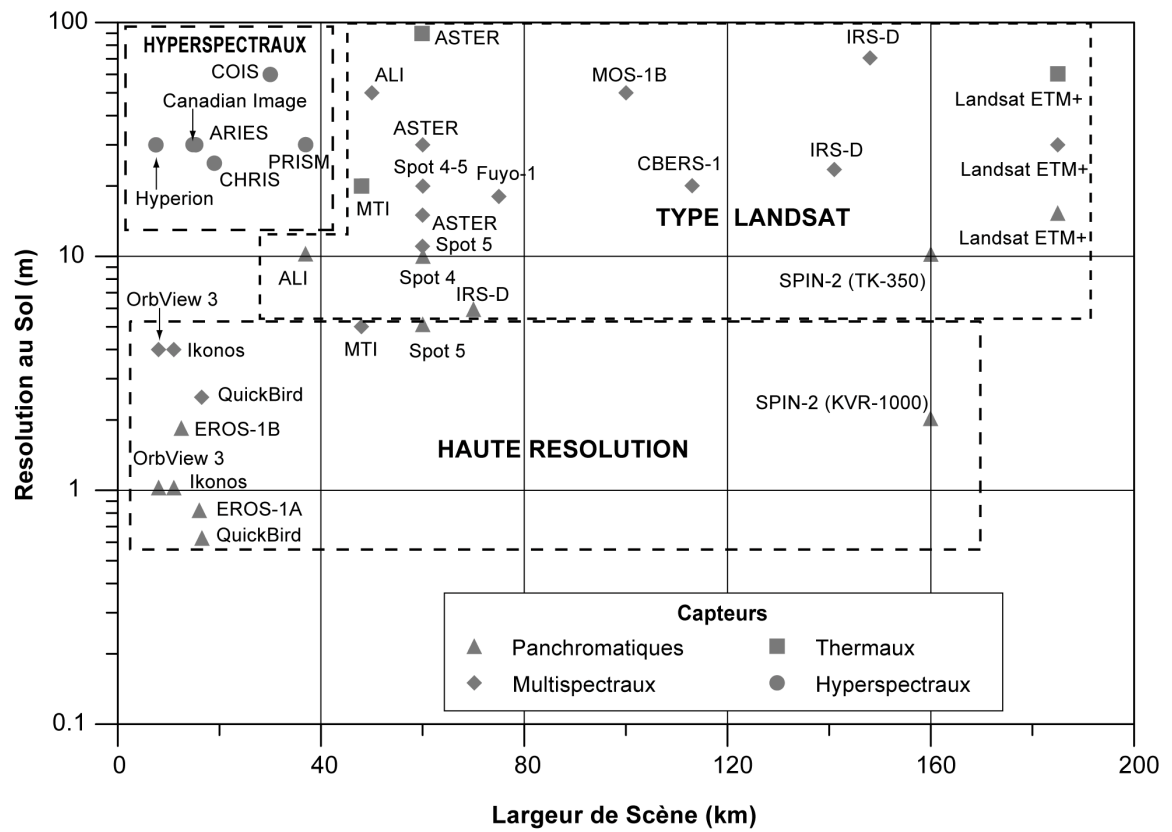


Figure 2: Classification des différents types de satellites (l'axe y est en logarithme).

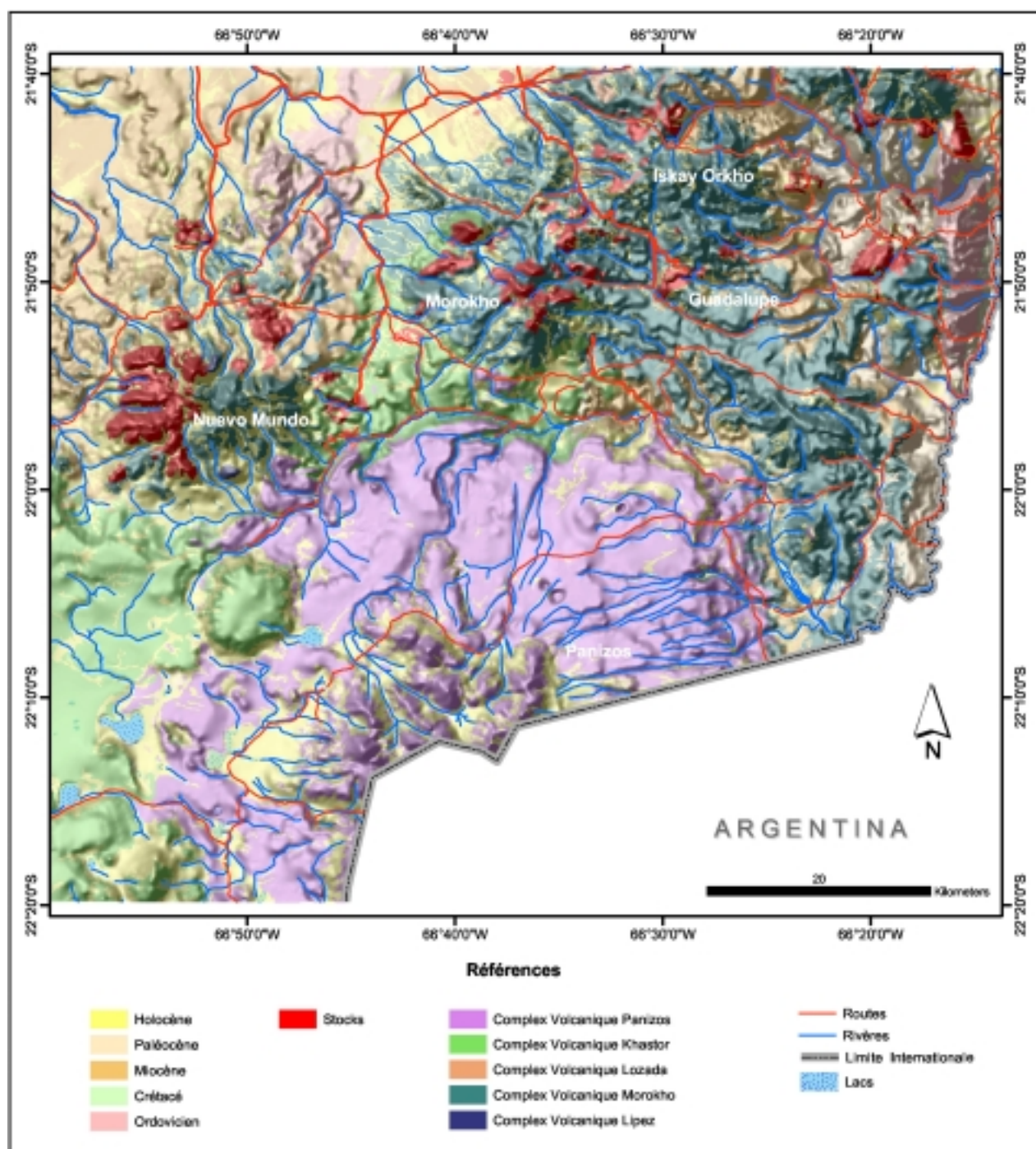


Figure 3: Cadre géologique de la région du Sud Lipé.

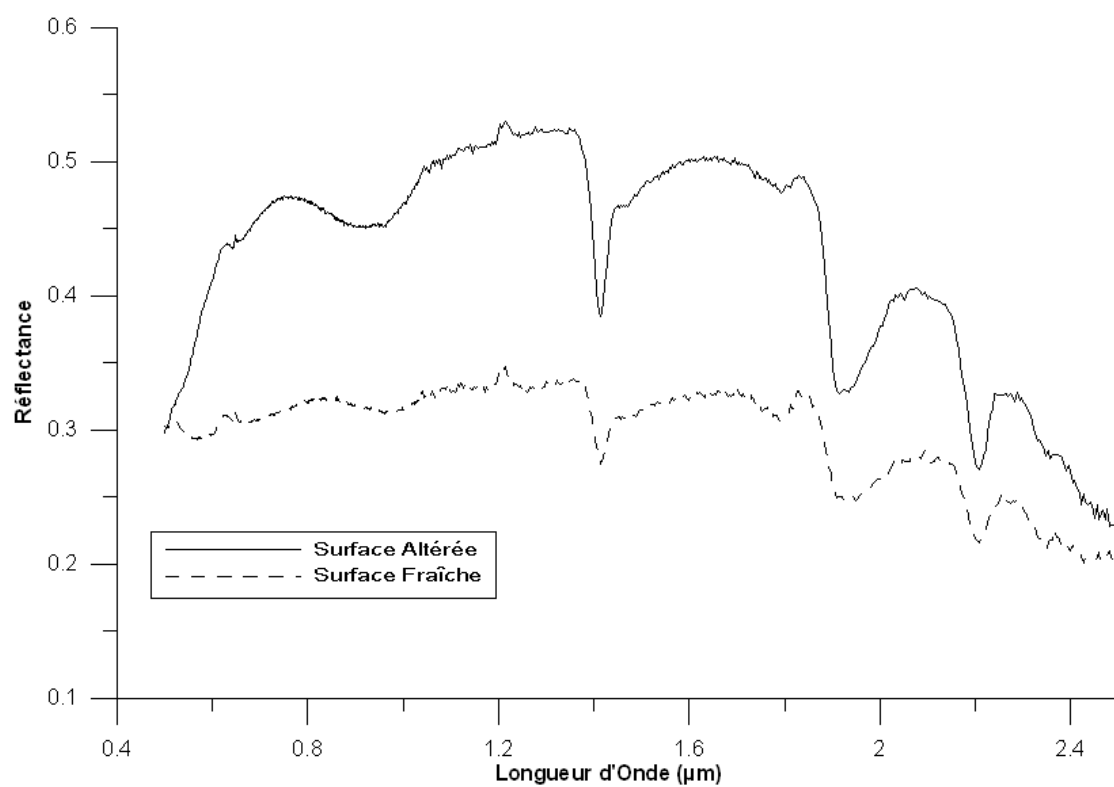
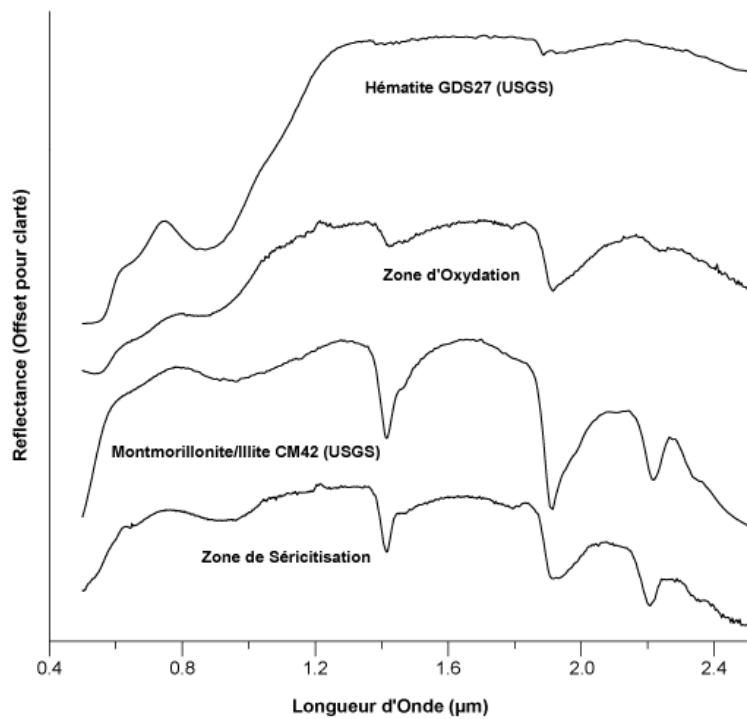
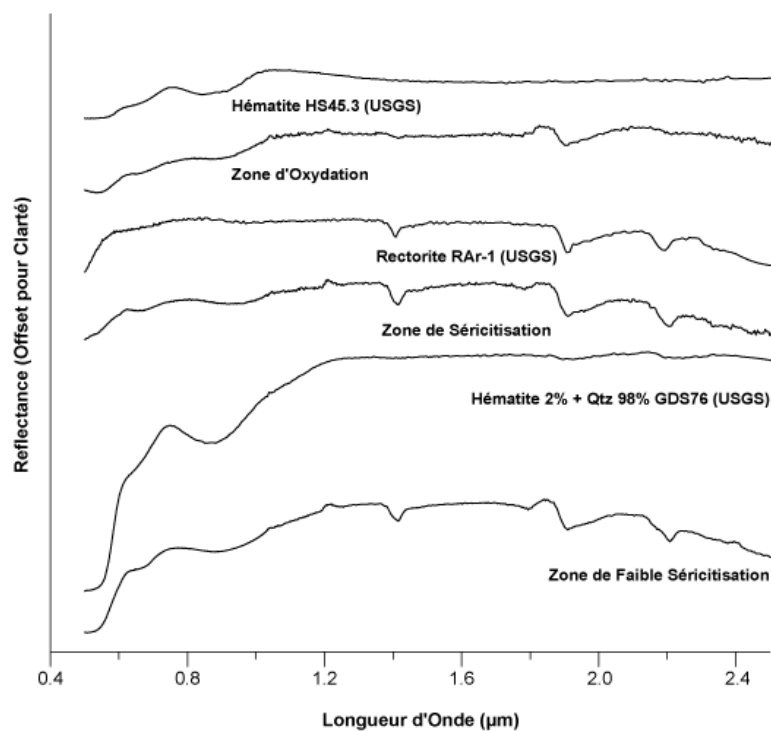


Figure 4: Comparaison entre le spectre d'une surface altérée et celui d'une cassure fraîche pour le même échantillon de roche.



a)



b)

Figure 5: Comparaison des spectres de terrain avec ceux de la base de données du Service Géologique Américain (a) des roches, (b) de sols.



Figure 6: Superposition d'une image Landsat TM 5 (bandes 2/5/7) sur le modèle numérique du terrain utilisée pour l'analyse des relations spatiales entre les différentes structures géologiques.

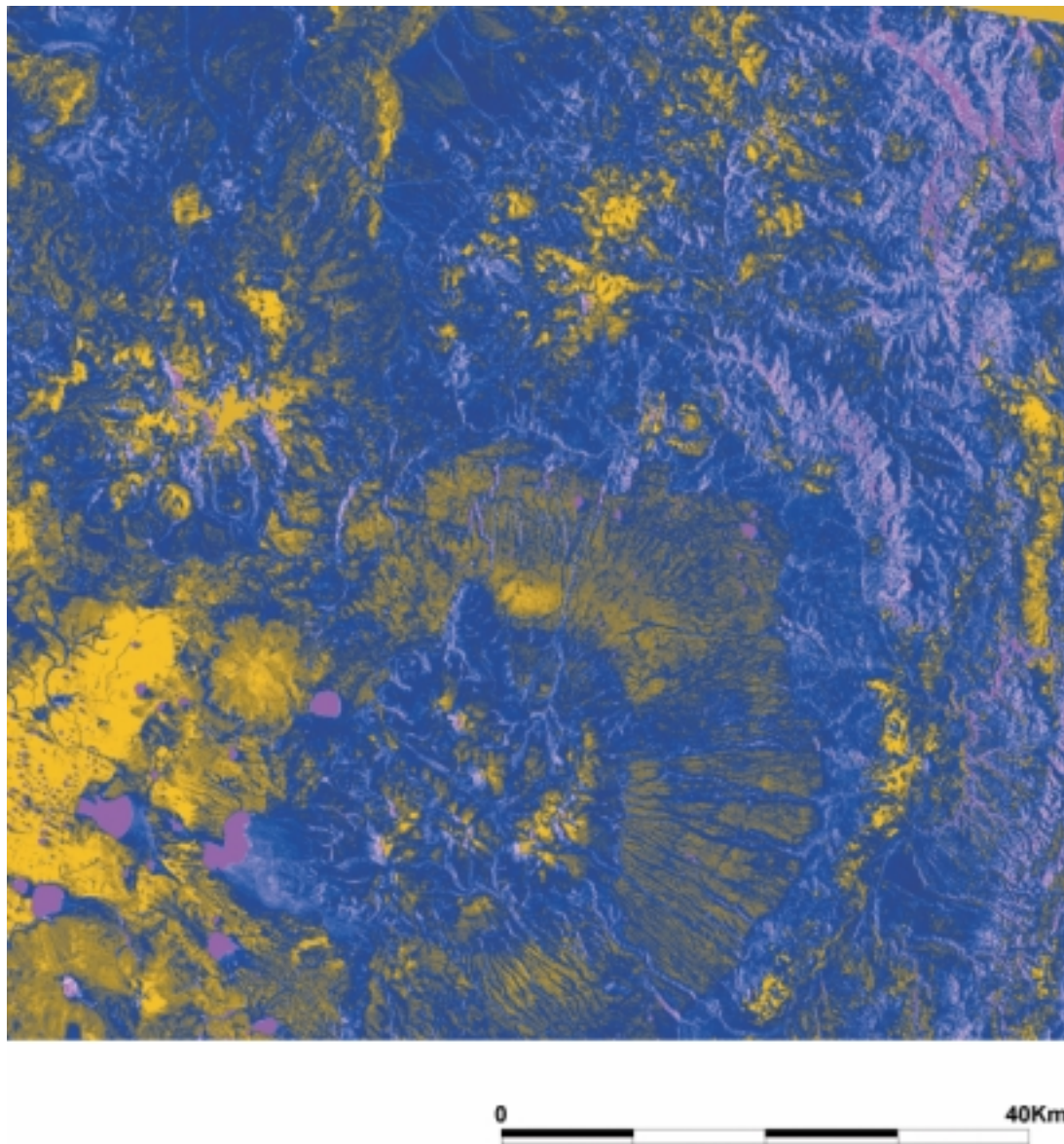


Figure 7: Rapport des canaux 3 et 1 de Landsat TM5. Les zones en jaune sont indicatives de la présence possible d'oxydes de fer.

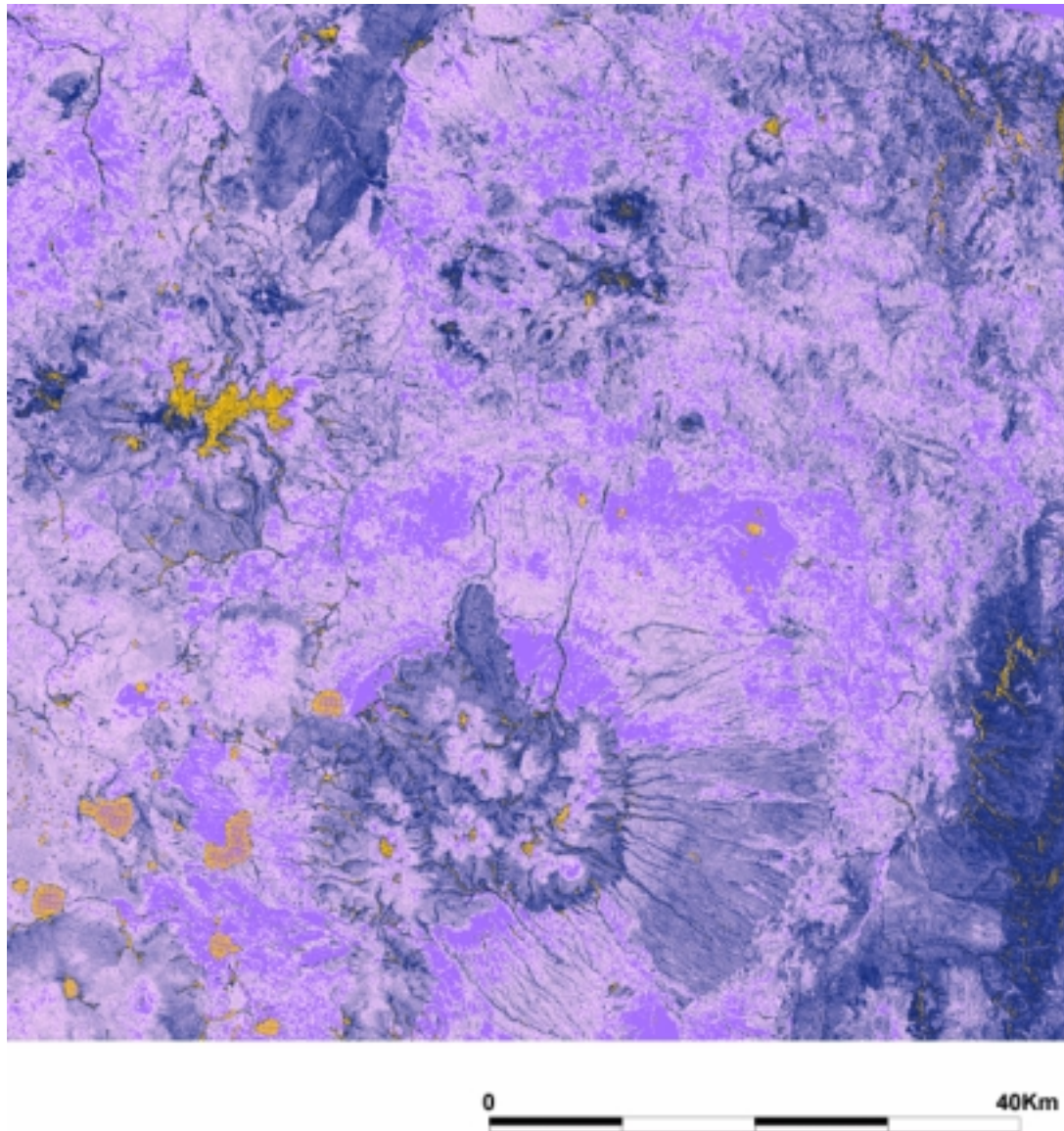


Figure 8: Rapport des canaux 7 et 5 de Landsat TM5. Les zones jaunes sont indicatives de la présence possible d'altérations hydrothermales.

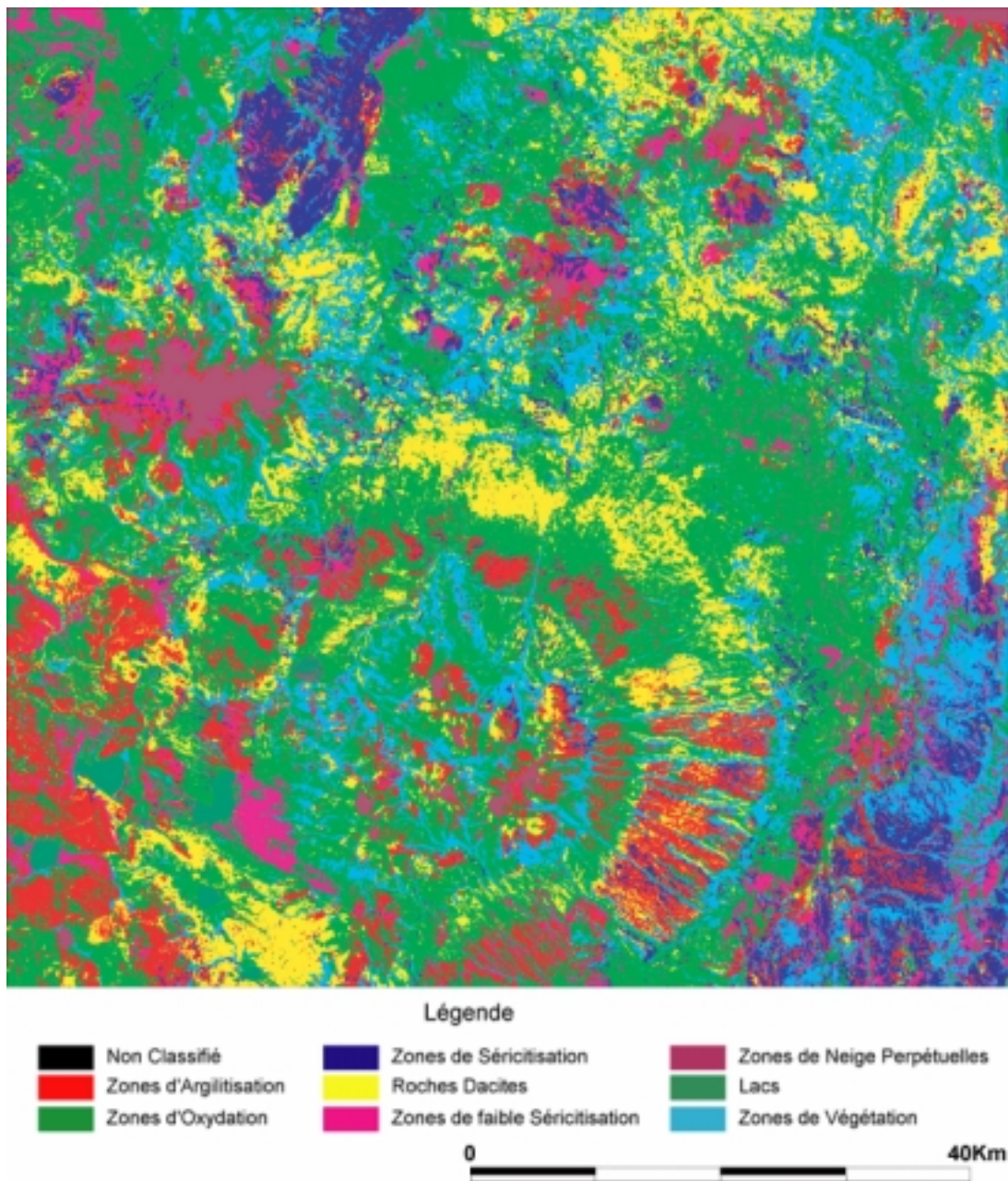


Figure 9: Classification des pixels de l'image Landsat TM5 selon leur ressemblance avec les sites d'entraînement identifiés lors de l'étude spectrale.