

APPORT DE LA RADIOMETRIE HAUTE RESOLUTION A LA TELEDETECTION GEOLOGIQUE. EXEMPLES DE ROCHES DU JABAL AL'AWAYNAT (LIBYE)¹

par

Ph. TREFOIS²

RESUME

Des mesures de spectres de réflectance réalisées en laboratoire sur échantillons de roches (cassures fraîches et surfaces altérées) du Jabal al'Awaynat (Libye) permettent de caractériser des types lithologiques par leur signature spectrale dans le visible et le proche infrarouge. Les effets des niveaux d'absorption d'énergie vibrationnelle (Al-OH, Mg-OH) dans la région de 2000 à 2400 nanomètres, la présence du fer en sites cristallins variés et l'effet global de la présence d'oxydes liée au métasomatisme acide sont particulièrement bien mis en évidence. Ces propriétés spectrales peuvent, après calibration, être utilisées comme guides pour l'exploitation des données du senseur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat.

ABSTRACT

Laboratory spectral reflectance measurements on rock samples (on fresh cuts and altered or coated surfaces) of the Jabal al'Awaynat (Libya) have been used to study the relationship between spectral reflectance properties and lithology. Sharp absorption peaks related to vibrational absorption peaks (Al-OH, Mg-OH) in the region of 2000 to 2400 nanometers, crystal field effects on ferrous or ferric ions, and global effect due to oxide minerals linked with acid metasomatism are particularly well evidenced. Those spectral signatures can be tied with the Landsat Thematic Mapper data, after calibration, and used as guides for image processing.

MOTS CLES

Télétection, réflectance, signatures spectrales, lithologie, régions arides, Libye.

KEY WORDS

Remote sensing, reflectances, spectral signatures, arid zones, Libya.

1. INTRODUCTION

En collaboration avec le laboratoire de télédétection du Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BRG) de Hanovre, nous avons réalisé des mesures de spectres de réflectance en laboratoire sur des échantillons de roches du Jabal al'Awaynat (Libye), avec les objectifs suivants :

1. Etablir une relation entre la composition chimique et minéralogique des roches étudiées et leur signature spectrale ;
2. Etudier l'effet de la patine désertique, et de l'altération en climat aride en général, sur les signatures spectrales de ces roches ;
3. Evaluer la possibilité d'identifier ou de discriminer les lithologies sur la base des données satellitaires de télédétection (de type Landsat Thematic Mapper) et guider le choix des traitements d'images.

Alors que le premier objectif ne peut être approché que par des mesures à haute résolution spectrale, le passage aux conditions réelles (et actuelles) de télédétection nous amènera à évaluer le pouvoir discriminant des données à faible résolution spatiale et spectrale, et les nombreux effets de l'environnement, et à aborder le problème général de calibration des données satellitaires.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La région du Jabal al'Awaynat est située au Sud-Est de la Libye, dans la zone frontalière Libye-Egypte-Soudan. Elle est caractérisée par la

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

² Laboratoire de Télédétection aérospatiale, Musée royal de l'Afrique centrale, Steenweg op Leuven, 19 - B-1980 Tervuren

présence de complexes annulaires intrusifs dans des gneiss précambriens (Archéens à Protérozoïque Inférieur) et par des séries sédimentaires horizontales d'âge paléozoïque inférieur à crétacé (Nubian Sandstones). Les deux complexes annulaires les plus importants sont ceux du Jabal Archenu et du Jabal al'Awaynat. Ce dernier, d'où proviennent les roches étudiées, a un diamètre de 24 km (fig. 1) (L. André *et al.*, 1989).

Au Nord se trouvent de petits pointements de granites alcalins et de grès Nubien, et les petits massifs de Karkur Hamid composés de syénites, trachytes et rhyolites.

La majorité des roches des complexes annulaires, à l'exception des roches hyperalumineuses et des laves, ont subi, à la fin de la mise en place du magma, un métasomatisme sodique (haute température) qui a pour effet d'albitiser les plagioclases et de transformer les augites en aegyrines.

Un métasomatisme acide subsolidus (basse température) s'est ensuite développé localement à proximité des dykes acides, formant des oxydes et du quartz.

3. ECHANTILLONNAGE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Nous avons choisi 28 échantillons, pour lesquels des lames minces et des analyses chimiques existent, parmi les nombreux échantillons collectés par J. Klerkx en 1968 et 1971, de façon à représenter les différentes lithologies de la région. Etant intéressés par les caractéristiques comparées des signatures spectrales plus que par des mesures quantitatives, nous n'avons pas réalisé de mesures sur poudres de granulométrie, de compaction et de degré d'humidité contrôlées. Nous avons utilisé des éclats de roches, de dimensions adaptées à l'appareil de mesure (quelques cm² de surface, épaisseur de l'ordre du cm).

De façon à estimer l'effet de l'altération ou de la patine, les mesures sont réalisées sur la surface naturelle de la roche d'une part, et sur cassure fraîche d'autre part. En l'absence d'un contrôle de terrain spécifique, une incertitude persiste cependant quant à la nature des surfaces dites "altérées".

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre visible/proche infrarouge Perkin-Elmer Lambda 9, piloté par un logiciel PECSS fourni par le constructeur. La gamme de longueur d'ondes utilisée est de 400 à 2500 nanomètres (la gamme spectrale possible étant de 185-900 nm pour UV et visible et 900-3200 pour le domaine IR), avec une précision de l'ordre de 1 nm (largeur de fente 4 nm, vitesse scan. 480 nm/min).

L'appareil mesure simultanément les flux d'énergie réfléchis par une référence Halon et l'échantillon, dans une sphère d'intégration de 60 mm de diamètre. Le rapport de ceux-ci (facteur de réflectance) est affiché et stocké en mémoire. La mesure est effectuée sur une surface de 8 X 20 mm.

4. INTERPRETATION DES MESURES

L'interprétation des spectres se fera sur la base des connaissances théoriques de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière, et par

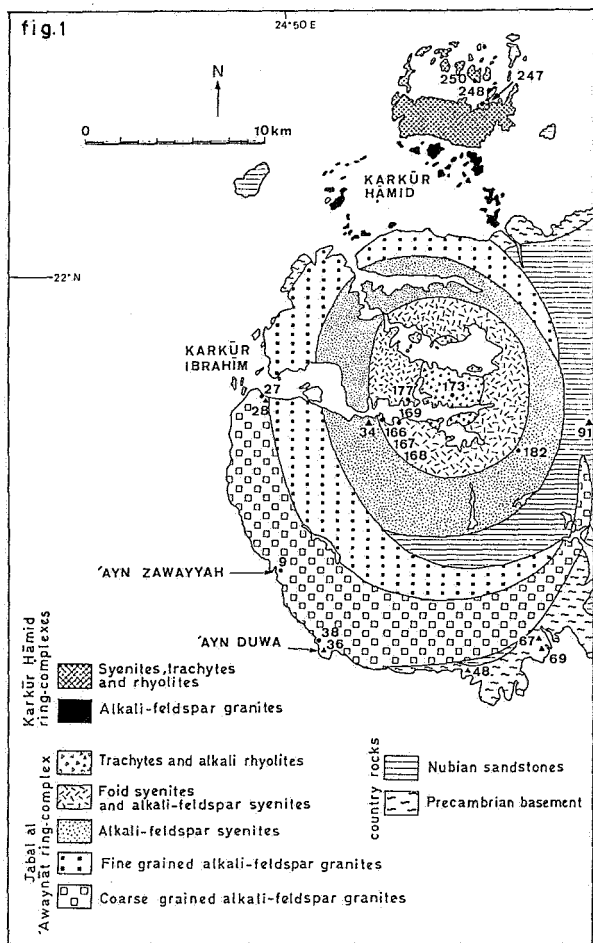


Figure 1. : Carte géologique schématique (d'après André *et al.*, 1989).

L'intrusion, d'âge tertiaire, est mise en place dans le socle précambrien et sa couverture sédimentaire.

Les structures annulaires externes sont constituées de granites alcalins grenus (Aïn Duwa) puis fins, passant vers l'intérieur à des syénites à néphilline. Le cœur de la structure est occupé par un complexe volcanique composé essentiellement de trachytes, rhyolites et phonolites.

Des dykes de quelques mètres d'épaisseur, cogénétiques et pénécotemporains de l'intrusion recoupent les épontes (gneiss, sédiments) et l'intrusion elle-même dans sa partie Sud-Ouest. Leur composition varie des roches basaltiques aux trachytes.

comparaison avec les données expérimentales existantes.

L'effet de l'altération ou de la patine désertique n'a été abordé que de manière très générale. On constate cependant que les spectres observés sur cassure fraîche conservent leur caractéristiques générales sur les surfaces en affleurement (fig. 2, 3 et 8) à l'exception de l'échantillon d'amphibolite (fig. 7), qui présente une croûte de signature totalement différente de celle de la roche fraîche.

La série sédimentaire

Le spectre des siltites se caractérise par la présence des bandes étroites d'absorption de la kaolinite, à 1390, 1409, 1934 et 2200 nm. Ces propriétés sont également bien observables sur surface altérée, qui se distingue de la cassure fraîche par une différence d'énergie totale (translation du spectre) et par des absorptions par le fer oxydé dans la région de 490 à 590 nm (fig. 2).

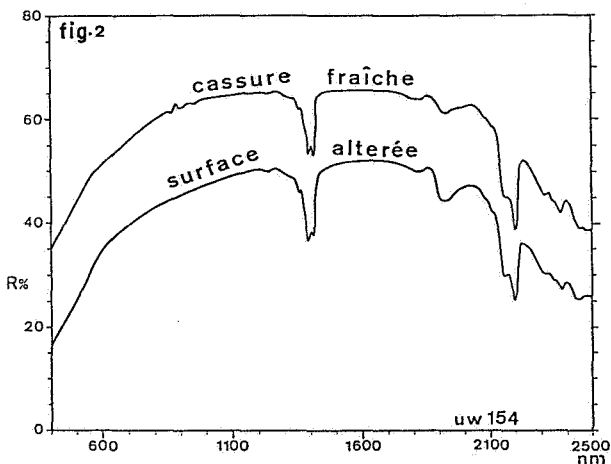


Figure 2. : Siltite, avec pics d'absorption typiques de la kaolinite.

Les gneiss

Les spectres des gneiss se distinguent nettement de ceux des sédiments par l'absence des pics d'absorption de la kaolinite (fig. 3).

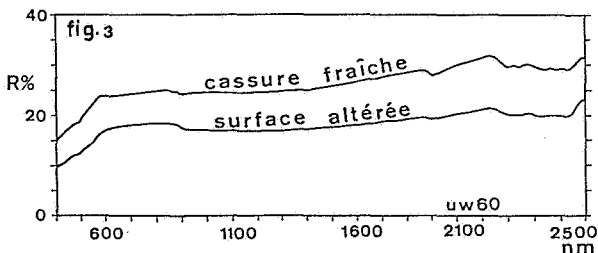


Figure 3. : Gneiss biotitique migmatitique.

Les granites alcalins

La comparaison des courbes de la figure 4 avec les lames minces correspondantes montre, au sein des granites alcalins, un effet important d'absorption généralisée à tout le domaine spectral, en relation avec la présence de minéraux opaques (oxydes) qui se sont formés lors du métasomatisme acide. Le granite UW 70 n'a lui subi qu'un

métasomatisme sodique. La comparaison avec des spectres du type UW27, UW29 (fig. 4) peut servir de guide pour la détection de zones potentiellement minéralisées en relation avec les différents types de métasomatisme.

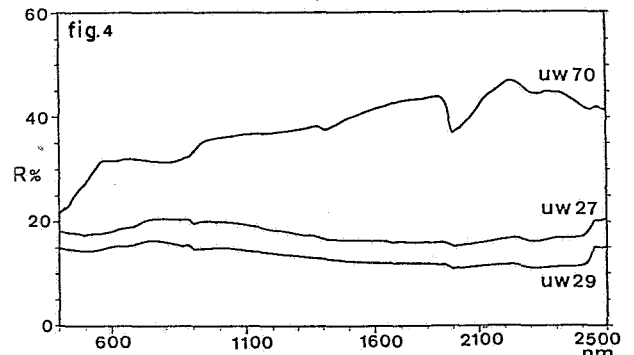


Figure 4. : Granites alcalins, effets de la présence d'oxydes.

En effet, des concentrations minérales réalisées lors d'un premier métasomatisme sodique peuvent être reconcentrées lors du métasomatisme acide (Ni, Terres Rares, V, Th, Be, Zn, W, Sn, Mo, Cu, Bi, Pb) (P. Bowden, 1985).

La mise en évidence de ce phénomène sera cependant délicate sur les images de télédétection, car il a un effet relativement similaire à des effets d'ombre ou de variation de l'éclaircissement.

Les syénites

Les spectres des syénites présentent une forme très particulière, avec un maximum vers 550 nm et un large creux entre 600 et 2200 nm.

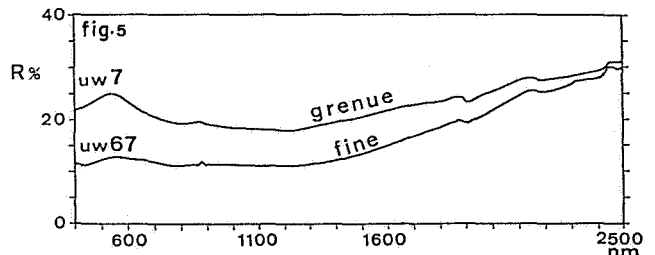


Figure 5. : Syénite grenue et microsyénite (cassure fraîche)

Cette large bande d'absorption est probablement liée à la présence de Fe^{3+} en site octaédrique dans l'aegyryne (pyroxène sodique $NaFe^{3+}Si_2O_6$ qui se substitue à l'augite $CaFe^{2+}Si_2O_6$). De plus, ces pyroxènes ont ici une composition particulière. Ils contiennent du titane et du zirconium.

La forme particulière des spectres dans leur ensemble devrait permettre d'identifier ces roches sur TM par combinaison de canaux. Elle reste valable aussi bien pour les faciès fins que grenus (simple translation) (fig. 5).

Les laves

Les trachytes, composées surtout de verre et de sanidine, se distinguent aisément des basaltes par un maximum de réflectance dans la région de 2100-2400 nm. Les basaltes frais ou simplement

patinés présentent un spectre plat et de faible réflectance globale (fig. 6).

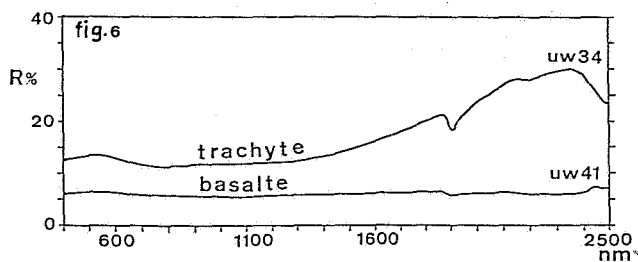


Figure 6. : Trachyte et Basalte (cassure fraîche).

Les amphibolites

Ces roches biminérales constituées de plagioclase et d'amphibole présentent sur cassure fraîche une large bande d'absorption autour de 900 nm lié au Fe^{3+} dans les amphiboles et un pic d'absorption à 2320 nm typique des hydroxyles de ces mêmes amphiboles. Sur surface altérée, l'hydrolyse du Fe modifie complètement la réponse spectrale (fig. 7).

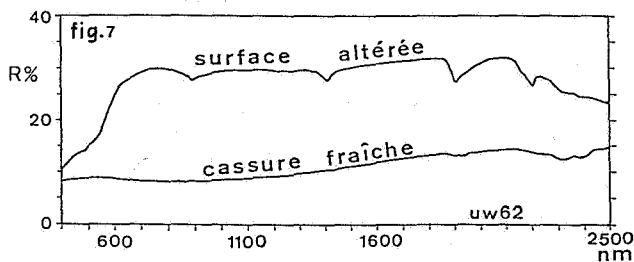


Figure 7. : Amphibolite.

Les dolérites

Nous noterons un échantillon de dolérite présentant les pics d'absorption caractéristiques de la chlorite dans la zone de 2100 à 2400 nm (fig. 8), la présence de celle-ci a été confirmée en lame mince.

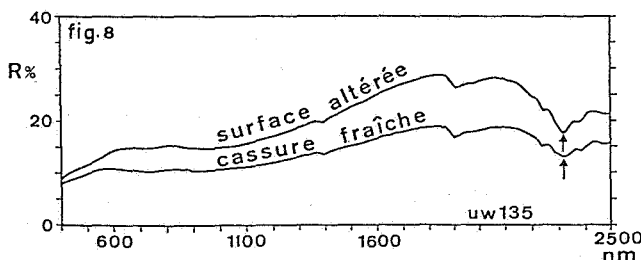


Figure 8. : Présence de chlorite dans une dolérite, par des pics d'absorption typiques dans la région de 2100 à 2400 nm.

La figure 9 présente la synthèse des observations et atteste du pouvoir discriminant des mesures par la variété des signatures spectrales observées.

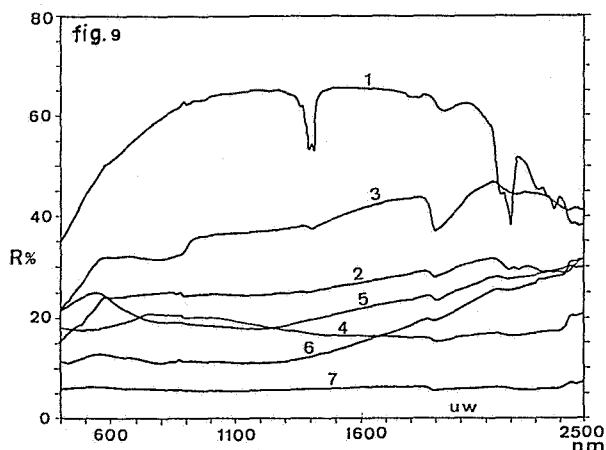


Figure 9. : Comparaison des spectres en fonction des lithologies. 1 : siltite, 2 : gneiss, 3 : granite alcalin, 4 : granite alcalin avec oxydes, 5 : syénite grenue, 6 : microsyténite, 7 : basalte.

5. RELATIONS AVEC LA TELEDETECTION

La faible résolution spectrale des senseurs actuels (par exemple une bande de 270 nm de large, de 2080 à 2350 nm pour le canal 7 de TM) ne permet pas de distinguer entre eux les pics d'absorption étroits liés aux phénomènes vibrationnels. Les relations globales entre les différentes régions du spectre restent cependant perceptibles malgré la faible résolution spectrale et constituent encore un bon outil de discrimination lithologique. Ainsi, des combinaisons de canaux TM peuvent caractériser la forme des spectres. Un rapport $TM5/TM1$ faible peut mettre en évidence la présence de minéraux opaques, car la réflectance des roches varie peu dans $TM5$, sauf pour les roches riches en minéraux opaques, et la valeur de $TM1$ se situe dans la région spectrale où les réflectances de roches restent en général faibles. Un rapport $TM5/TM7$ prendra des valeurs élevées en présence d'hydroxyles et, une combinaison $TM5/TM4 \times TM3/TM4$ caractérise la forme du spectre dans la région de la large bande d'observation du Fer centré autour de 1μ (Sultan *et al.*, 1987).

Par rapport à cette discrimination basée sur la forme des spectres, une identification des lithologies exige des traitements plus complexes :

Etant donné leur taille (30 m X 30 m pour TM), peu de pixels représentent des objets purs. La plupart sont caractéristiques de mélanges d'objets sur la surface du pixel. La figure 10 illustre les effets du mélange siltite-végétation.

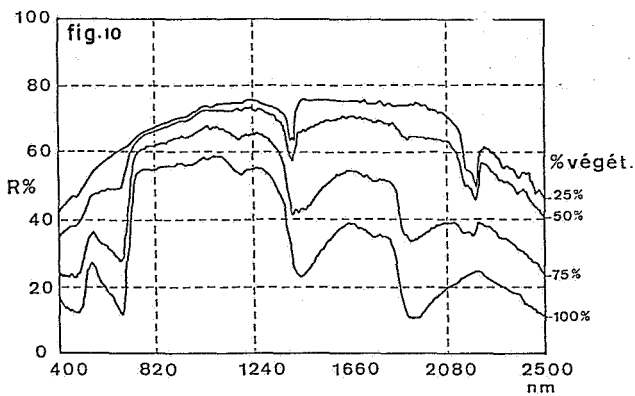


Figure 10. : Spectres de mélanges siltite/végétation en proportions variées de surface de la cible.

Les variations de l'éclairement liés à la topographie, associés au caractère non lambertien des objets, conservent la forme générale des signatures spectrales, mais modifient l'énergie totale réfléchie (fig. 11).

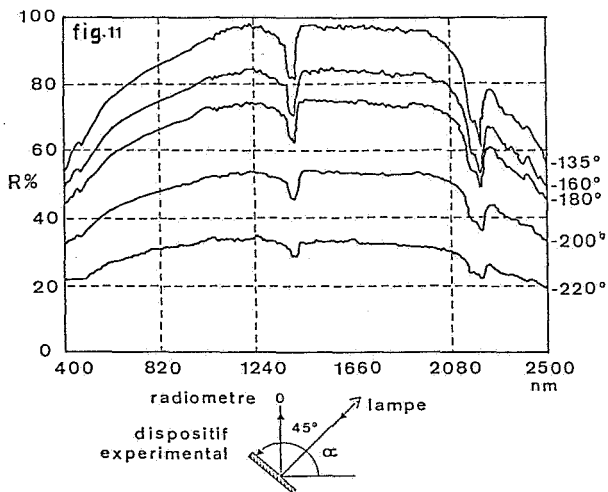


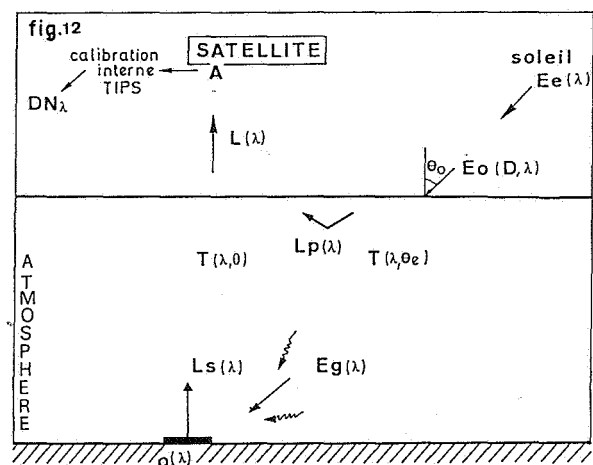
Figure 11. : Effet de la géométrie de l'éclairement.

Enfin, les différences les plus fondamentales entre les mesures de laboratoire et les données de télédétection sont dues à la source d'éclairement (le soleil), à l'intervention de l'atmosphère, et à la calibration interne des senseurs (fig. 12). Ces problèmes font l'objet de recherches spécialisées.

6. CONCLUSIONS

Les mesures de spectres de réflectances à haute résolution, en laboratoire, peuvent constituer, dans le cas étudié, un outil d'identification minéralogique et un bon outil de discrimination lithologique.

L'effet des patines doit être pris en compte en fonction de leur effet sur les signatures spectrales et de leur abondance, qui peut varier dans chaque site étudié.



Radiance captée par le satellite $L(\lambda)$

- filtrage de l'atmosphère $T_{tot}(\lambda, 0)$
- apport additif de l'atmosphère : radiance atmosphérique $L_p(\lambda)$

Radiance diffuse au sol $L_s(\lambda) = \frac{L(\lambda) - L_p(\lambda)}{E_{tot}(\lambda)}$

Reflectance de la cible $\rho(\lambda) = \pi \frac{L_s(\lambda)}{E_g(\lambda)}$

ou $E_g(\lambda)$ = irradiance globale au sol = $F(E_e(\lambda), D, \theta_0, \lambda)$

Figure 12. : Relations entre la réflectance d'un objet et la donnée satellitaire correspondante.

Dans le cas présenté, les signatures spectrales pourront également être utilisées pour détecter les zones à métasomatisme acide et donc de minéralisations potentielles.

Dans la région du Jabal al'Awaynat, les résultats de cette étude trouvent une application dans le domaine de la télédétection, à condition de tenir compte des différences importantes entre les conditions rencontrées en laboratoire et dans la réalité de la télédétection. On pourra alors, après calibration adéquate des données (Crippen, 1988) :

1. choisir les meilleures bandes spectrales (ou combinaisons de canaux) à utiliser dans les traitements d'images à finalité géologique ;
2. mettre au point des algorithmes d'identification et de discrimination des lithologies basés sur les caractéristiques spectrales des roches.

REFERENCES

- ANDRE, L., KLERKX, J. & BUSREWIL, M. TM, 1989 - Geochemical and Rb-Sr isotopic data of felsic rocks from the Jabal al'Awaynat alkaline intrusive complex (SE Libya). *Proc. 3rd Symp. Geology of Libya* (in press).
- BIGGAR, S.F., BRUEGGE, C.J., CAPRON, B.A., CASTLE, K.R., DINGUIRARD, M.C., HOLM, R.G., LINGG, L.J., MAO, Y., PALMER, J.M., PHILLIPS, A.L., SLATTER, P.N., WITMAN, S.L., JUAN, B., JACKSON, R.D., MORGAN, M.S. & SAVAGE, R.K., 1985 - Absolute Calibration of Remote Sensing Instruments. *Proc. 3rd Int. Colloq. Spectral signatures of objects in Remote Sensing*, Les Arcs, France, 309-314.

BOWDEN, P., 1985 - The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa. *Jour. African Earth Sciences*, 3: 17-39.

CRIPPEN, R.E., 1988 - The danger of underestimating the importance of data adjustment in band ratioing. *Int. Jour. Remote Sensing*, 19:767-776.

SULTAN, M., ARVIDSON, R.E., STURCHIO, N.C. & GUINNESS, E.A., 1987 -

Lithologic mapping in arid regions with Landsat Thematic Mapper data : Meatiq dome, Egypt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 99: 748-762.

Manuscrit reçu le 15 septembre 1989 et accepté pour publication le 29 décembre 1989.