* Manuscrit reçu le 22 octobre 1993, accepté définitivement le 6 juin 1994.
(1) Département Télédétection, BRGM, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2.

Apport du canal moyen infrarouge (1,55-1,75 µm) à la cartographie géologique en milieu couvert : la région d'Elven, Bretagne*

Georges DELPONT ⁽¹⁾ Jean-François DESPRATS ⁽¹⁾ François GIRAULT ⁽¹⁾

Middle infrared wavelength (1.55-1.75 μ m) contribution to geological mapping below soil cover: the Elven area, Brittany

Géologie de la France, n° 2, 1994, pp. 21-30, 3 fig., 1 tabl., 1 pl. photo couleurs.

Mots-clés : Télédétection, Thematic Mapper (Moyen infra-rouge), Cartographie, Sol (Sol nu), Humidité sol, Briovérien, Granite, Primairc, Pliocène, Morbihan (région Elven)

Key words: Remote sensing, Thematic Mapper (Middle infrared), Cartography, Soils (Bare soils), Moisture, Brioverian, Granites, Paleozoic, Pliocene, Morbihan (Elven area)

Résumé

En région couverte peu affleurante et à morphologie peu contrastée, la cartographie géologique nécessite, du fait de la faible densité des affleurements, l'utilisation de données d'observation indirecte de la surface terrestre. A la géophysique et la géochimie, classiquement utilisées quand existent des études antérieures, s'est ajoutée, ces dernières années, la télédétection dont les données sont comparativement peu onéreuses et facilement accessibles.

L'essentiel de l'information extraite de ces données est, le plus souvent, relative à la morphologie mais l'étude de la radiométrie des sols nus peut venir compléter utilement cette information. En effet, la relation existant entre les roches mères et les sols surincombants peut être considérée comme assez étroite, hormis dans le cas d'accumulation de formations superficielles exogènes.

Dans la région d'Elven, en Bretagne centrale, le canal moyen infra-rouge

 $(1,55-1,75 \ \mu m)$ du capteur Landsat Thematic Mapper (TM) permet de différencier des pointements leucogranitiques et des dépots pliocènes récents de leur environnement schisto-gréseux briovériens et de cartographier leurs limites. Cette différenciation est effectuée grâce à une analyse des variations de la radiométrie des sols nus qui recouvrent les formations géologiques sous-jacentes. Les variations sont corrélées à celles de leur taux d'humidité résiduelle qui s'avère fortement contrôlé par la composition granulométrique des sols. Le rapport argiles/éléments grossiers, qui dépend en grande partie de la composition de la roche mère, peut être considéré, avant la matière organique, comme le facteur primordial déterminant l'humidité, et donc la radiométrie.

La précision des limites géologiques obtenues par l'interprétation de telles images est comprise entre 0 et 50 m dans 62 % des cas (124 points test) et entre 0 et 100 m dans 73 % des cas. Le niveau de précision est compatible avec l'ambition de ce type d'étude qui est de fournir un document de travail amont fiable au géologue cartographe. L'intérêt de ce type d'approche sera d'autant plus grand que l'infrastructure géologique du pays étudié sera limitée.

English abridged version

The Brittany region is a peneplaned sub-horizontal plateau that was re-incised by recent regressive erosion. this type of morphology, where rare outcrops combine with intense agricultural landuse, renders geological mapping very difficult, and most knowledge of the geological substratum must be deduced from surface indications. The indirect observation of the Earth's surface, using geochemistry or geophysics, thus represents an important source of alternative information. In this context, remote sensing forms a valuable tool for obtaining preliminary field information, as well as being a guide for certain types of mineral exploration and in some cases even an instrument for final compilation.

Morphological analysis generally contributes the most pertinent geological information that is contained in a satellite image. However the data from the Thematic Mapper (TM) sensor carried by Landsat, in particular those obtained in the Middle infra-red (MIR) band, enable a differentiation based on the spectral response of bare soil, which is caused by variation in the soil-moisture content. Apparently a relationship exists between the physico-chemical composition of autochthonous soil and that of the subsurface. The present paper confirms the validity of this approach.

Geographic and geological setting, and existing maps

The study area lies to the southwest of Rennes, in central Brittany, and has a mild and humid temperate climate. Agriculture is mostly based on animal husbandry and fodder crops.

Geologically (fig. 1), the area lies at the contact between the Central Armorican Domain (DCA) and the Ligerian-Vendean Domain (DLV), bounded by the northern branch of the South Armorican Shearzone [Cassard and Chantraine, 1990; Braux et al., 1991] In the north, it consists of Brioverian schist-sandstone that has been injected by Hercynian leucogranite (DCA), whereas to the south the study area is underlain by Paleozoic schist/sandstone and the Landes de Lanvaux granite of the DLV unit. Locally, outcrops of Pliocene sand and gravel are known.

Geological maps of the area mostly are the old 1:80.000-scale edition, which was the basis of evaluating the interest of using satellite images.

The relationship between reflectance of soil and its moisture content

The relationship between reflectance intensity and moisture content of a soil has been the subject of much work [Stoner and Baumgardner, 1981; Louhala, 1987; Courreau, 1989; Escadafal, 1989; Bedidi, 1992; Razia Garcia, 1992]. Their general conclusion is that an increase in humidity will cause a decrease in reflectance for all wavelenghts. However, the interpretation in the MIR band is the most direct, in view of an intensification of water-absorption bands around 1.45 and 1.95 µm.

Image used, choice of optimum spectral band and main treatment steps

The TM image 202-27 used was recorded on 11 March 1987 after a rather dry period, thus leading to hydrous contrast that in principle should be good. This favoured the distinction between light, sundried soil and heavy soil that is still humid. The spectral band was chosen after studying histograms of the image which showed that Band 5 had better dynamics than Band 7. Most of the study was thus based on the potential interest of this wavelenght.

After geometric correction, the image was restituted as a false-colour photographic document, combining bands 4 (near infrared), 5 (middle infrared) and 2 (green), and which forms the main support of visual analysis of the images. The relevance of Band 5 (MIR) for the differentiation of soil was confirmed by various classifications and by the image of the 5/2 ratio that also turned out to be quite suitable for discrimination.

Mcthod of image analysis

The images resulting from the various approaches were visually analysed. Comparison with the available geological maps indicated several points that will be discussed hereafter.

TM image 452 (pl. 1a). This image shows good geographical correlation between plots that are green (in principle dry soil) and blue (in principle moist soil), and, respectively, granite and Brioverian rock as shown on the existing geological map. The image also reveals many detail differences between the outlines of these geological units as seen on image (fig. 2a) and map (fig. 2b).

However, it cannot be said that there is a clear correlation between colours, i.e. moisture content and radiometry of soils, and geological formations. Northeast of the Lizio granite, for instance, the green plots correspond to Pliocene sands and gravel deposits, the sun-drying of whose light soil cover should take about as long as a soil over granite. The granite also shows several anomalies, e.g. green bare soil over Paleozoic schist and blue bare soil over granite, which may be due to local variations in vegetation and/or morphology.

Classification and ratio-type processing (pl. 1b and 1c). Such processing does not enable the continuous tracing of boundaries between rock types, but confirms the main lines of the interpretation. Classification and ratio show up granite within schist formations, and also indicate anomalies that correspond to "humid" soil within granite (green and blue patches), or "dry" soil (mauve and red patches) within Brioverian or Paleozoic schist. They also reveal the Pliocene formations in the northeast corner of the image.

Radiometry and soil composition

Soil analysis of the radiometrically most characteristic plots within the various schist and granite units explains several of the observed phenomena. A total of 24 samples were taken and investigated for their grainsize (5 fractions, including clay), equivalent moisture, organic matter and iron content. After grouping for each sample of the mineral elements that can cause high water retention, i.e. clay and fine silt particles of $< 20 \mu m$, the results were analysed. This consisted in comparing the control of moisture factors on effective soil moisture, as well as the latter's influence and that of iron on the resulting radiometry. This is plotted in graphs (fig. 3) that require some comments :

- Soil over granite is grouped under low moisture values, whereas soil over schist has high moisture values (fig. 3a), this distribution may be due to the higher clay content of the latter soil type.

_ Adding organic matter as a moisture factor (fig. 3b) does not fundamentally change soil dispersion, which indicates that the influence of subsurface rock types is dominant. - Comparison of numerical values of the analysed criteria and those of radiometry of the corresponding plots on the image, shows a continuous decrease in dispersion of Band 5 (fig. 3e) and Band 6 (fig 3f), passing through bands 4 and 2 (figs. 3d and 3c). This shows that the relationship between soil moisture and radiometry can be used at least locally for lithological discrimination, provided this is supported by detailed field calibration.

- Finally, the ratio TM5/TM2, compared to moisture factors (fig. 3g and 3h), leads to a very clear grouping of soil over granite for high TM5 and low TM2 values, and to an inverse ratio over schist.

Recognition of units mapped by remote sensing

Soil analyses thus confirm that radiometric data extracted from satellite images especially from the MIR Band, correlate quite well with the degree of moisture of bare soils on the date the image was taken, and that such information can be used for distinguishing granite from surrounding schist. Classification and ratio show the presence, through low moisture content, of Pliocene detrital deposits, whose composition would justify a moisture content close to that of soil over granite;

Radiometrically "dry" soil is found within the Brioverian without being allochthonous. This might betray the presence of more sandy patches in such soil, or of fractures and veins filled by quartz or igneous rock. However, it should not be forgotten that this type of approach is based on statistics, and that the variability of natural features can create anomalies that are not always easy to correlate with geological phenomena.

Field validation

Validation was based on 124 observation points, which were defined in a random manner such as road intersections with image and map boundaries. The reliability of the interpreted satellite data was evaluated by comparing them with the existing geological map. For each observation point, the distances between geological and image-interpretation boundaries, and between geological and map boundaries were measured under the same conditions.

These values were split into five classes: 0-50 m. 51-100 m. 101-150 m. 151-200 m and > 201 m. The first of these corresponds to the order of precision of geometrical image correction (1.5 pixels, or 45 m), and the second to that of field mapping in Brittany, where outcrops are rare. Table 1 shows the distribution of these distances and confirms that, in this case, a better accuracy can be expected from the image than from the existing 1:80,000-scale map. Of the geological boundaries seen on the map, 46 % can be considered as precise, i.e. < 100 m, against 73 % of the boundaries deriving from image interpretation; the strongest differences, i.e. > 200 m, decrease by 60 % for image boundaries.

The fieldwork provided the following information:

- Visual interpretation of the falsecolour image 452, which shows the greatest variation, provides the best picture of geological reality.

- The heterogeneous land-use pattern is a major limiting factor for the mapping of geological formations on the basis of radiometric soil analysis.

- Recognition of small or fragmented plots is not easy because of the difficult recognition of local radiometric variations that are unrelated to geology, e.g. the Pliocene sand and gravel deposits.

Conclusions

Fine morphological analysis of covered ground from airborne or satellite data generally is the main contribution of remote sensing to geological mapping. Nevertheless, this seems to be usefully complemented by radiometric data in those cases where a relationship can be established between the spectral response of bare soil and underlying geological formations.

In our example of the Elven area in central Brittany, the medium-infrared (1.55-1.75 µm) band, or Band 5, of the Landsat V Thematic-Mapper sensor enables the zoning of bare soil according to its moisture content. This zoning, which is largely dependent upon the type of weathering product of the underlying bedrock, provides the mapping geologist with a predictive geological sketch map of the area of interest. After field verification, this can be used for guiding and speeding up detailed mapping, as the degree of accuracy of the geological boundaries thus obtained is compatible with the scale of this type of work.

This approach does not explain all radiometric variations, but, as an early investigation method and in combination with morphological interpretation, the method seems to be a valuable source of indirect information that will help the geologist who works in areas with few outcrops.

Introduction

La région de Bretagne (fig. 1) se présente schématiquement comme un plateau subhorizontal, résultat d'une pénéplanation intense, réentaillé par une érosion régressive récente. Une telle morphologie, jointe à une intense occupation agricole du sol, rend très difficile la cartographie géologique : les affleurements sont rares et de faible extension et le plus souvent limités aux flancs des vallées rajeunies. Le cartographe est ainsi contraint de déduire la nature et l'organisation des formations géologiques à partir d'indices de surfaces (pierres volantes, etc) ou à partir de travaux de tarrière plus précis, mais coûteux.

L'observation indirecte de la surface terrestre représente dans de telles conditions une source d'information alternative importante pour le cartographe. Données ponctuelles (banque des données du sous-sol) ou régionales (cartes de géochimie ou de géophysique) aident à structurer les observations de terrain. C'est à cette dernière échelle que trouve sa place la télédétection, aussi bien comme outil de connaissance préalable du terrain que comme guide d'exploration voire comme instrument de synthèse final.



L'analyse fine de la morphologie apporte, le plus souvent, l'information géologique la plus pertinente contenue dans une image satellitaire. Cependant, la combinaison des données enregistrées dans les bandes spectrales allant du bleu au moyen infra-rouge (MIR) du capteur Thematic Mapper de Landsat (TM) permet d'affiner les observations en ajoutant aux analyses précédentes des différenciations liées à la réponse spectrale des sols nus : celles causées par les variations du taux d'humidité sont notamment bien mises en évidence par le moyen infra-rouge et il semble fondé de penser qu'il existe une relation entre la composition du sol (ses propriétés physico-chimiques) et celle du sous-sol, excepté dans les cas d'accumulation de formations superficielles exogènes.

La présente étude confirme l'intérêt de cette approche qui devrait s'avérer d'autant plus profitable qu'elle sera appliquée à des régions dont l'infrastructure géologique sera, contrairement au cas de la Bretagne et de la France en général, plus limitée.

Situation géographique et géologique. Cartographie existante

La zone étudiée, située au sud-ouest de Rennes, dans le département du Morbihan, en région de Bretagne, jouit d'un climat tempéré doux et humide, propice à une agriculture basée sur l'élevage et les cultures fourragères, maïs, prairies, etc.

Géologiquement, elle est localisée (fig. 1) au contact entre le Domaine



Fig. 1. – Localisation géographique de la zone d'étude et schéma structural du Massif armoricain (*in* Braux *et al.*, 1991).

Fig. 1. – *Geographic location of the study area and structural diagram of the Armorican massif* (in Braux et al., 1991).

Centre Armoricain (DCA) et le Domaine Ligéro-Vendéen (DLV), limités par la branche nord du Cisaillement Sud Armoricain (Cassard et Chantraine, 1990 ; Braux et al., 1991). Elle est principalement constituée, au nord, par les formations schisto-gréseuses briovériennes, perturbées par des intrusions de leucogranites hercyniens (DCA) et, au sud, par les formations paléozoïques schisto-gréseuses et granitiques des Landes de Lanvaux (DLV). Localement, sont signalés des affleurements de matériel pliocène, sable, graviers, poudingues, notamment au nord du granite de Lizio.

La cartographie géologique de cette zone repose actuellement, pour l'essentiel, sur l'édition ancienne à l'échelle du 1/80 000 et seul l'angle sud-est bénéficie à ce jour d'une cartographie géologique récente à grande échelle (1/50 000, feuille de Malestroit). C'est par rapport à l'édition ancienne que l'apport des images sera le plus probant, le niveau de détail requis pour l'élaboration de l'édition récente étant moins compatible avec les données numériques actuelles.

Généralités sur la réflectance des sols et leur taux d'humidité

Les relations entre l'intensité de la réflectance des sols et leur taux d'humidité ont fait l'objet de nombreux travaux (Bedidi,1992 ; Coureau,1989 ; Escadafal,1989 ; Louhala ,1987 ; Razia Garcia, 1992 ; Stoner et Baumgardner, 1981). Il en ressort qu'une augmentation d'humidité entraîne une baisse générale de la réflectance dans toutes les longueurs d'onde.

Dans le visible, les phénomènes sont complexes puisque la taille des particules comme la distribution de l'eau dans les deux systèmes de porosité, inter- ou intraparticulaire, peuvent avoir un effet comparable à celui de l'humidité sur les spectres de réflectance. Dans l'infra-rouge, l'augmentation du taux d'humidité se traduit essentiellement par un abaissement systématique de la réflectance et par une intensification des bandes d'absorption de l'eau, localisées vers 1,45 et 1,95 µm : l'interprétation de la réflectance des sols y semble moins problématique. Ainsi ont été testées les possibilités des bandes 5 (1,55-1,75 μ m) et 7 (2,08-2,35 μ m) du capteur TM, malgré leur décalage vers la droite par rapport aux valeurs précises des bandes d'absorption de l'eau.

Image utilisée et choix du meilleur canal spectral

L'image TM utilisée (202-27) a été enregistrée le 11/03/87, à la suite d'une période de temps plutôt sec. Une seule journée pluvieuse est enregistrée le 7 mars, au milieu d'une période de 10 jours brumeux à ensoleillés. Elle présente donc a priori des contrastes hydriques relativement accusés, favorables à une meilleure différenciation entre les sols légers ressuyés et les sols lourds encore humides.

Le choix du canal spectral se fait à l'issue de l'examen des histogrammes de l'image qui montre que le canal 5 bénéficie d'une meilleure dynamique que le 7 : 78 % des valeurs numériques s'étalent sur 55 niveaux (24 à 79) pour le canal 5 alors que 79,5 % des valeurs se répartissent sur 29 niveaux (09 à 38) pour le canal 7. 19,2 % des valeurs numériques restantes sont concentrées, pour les deux canaux, sur les deux premiers niveaux (0 et 1), le surplus étant éparpillé aléatoirement. L'utilisation du canal 5 laisse donc espérer des différenciations plus fines et c'est sur l'intérêt éventuel de cette longueur d'onde que portera l'essentiel de cette étude.

Avant tout traitement, l'image est mise en conformité géométrique par rapport au fond topographique de référence. Une première restitution, sous forme d'un document photographique en fausses couleurs, composé des canaux 4 (proche infra-rouge : PIR), 5 (moyen infra-rouge : MIR) et 2 (vert : V), forme le support principal de l'analyse visuelle de l'image qui présente la plus grande variabilité.

Différentes classifications ont confirmé la pertinence du canal 5, MIR, dans la différenciation des sols, par rapport aux autres canaux infra-rouge comme le 7, voire l'infra-rouge thermique (canal 6) dont la dynamique est très faible (80 % des valeurs sur 10 niveaux). L'image du ratio 5/2, dont les parcelles de végétation ont été masquées, s'est révélée également porteuse d'une bonne aptitude à la discrimination.

Méthode d'analyse des images

Les images résultant des différentes approches sont analysées visuellement, qu'il s'agisse de l'image en fausses couleurs (452), de la classification supervisée, réalisée avec les mêmes canaux, ou du ratio 5/2, visualisé, comme la classification, à l'aide de pseudo-couleurs.

Les unités de couleurs de sols nus ainsi définies sont susceptibles de matérialiser les caractères d'iso-comportement des sols vis-à-vis de l'humidité. La comparaison avec les cartes géologiques disponibles permet de formuler plusieurs remarques préliminaires qui soutendent la réflexion de la présente étude.

L'image TM 452 (pl. 1a)

Cette image montre une bonne coïncidence géographique générale, entre les parcelles de couleur verte (correspondant a priori à des sols secs) et bleue (correspondant a priori à des sols humides) et les principales formations. respectivement granitiques et schistogréseuses indiquées par la carte géologique existante. Le halo de métamorphisme de contact qui entoure les massifs de leucogranites n'est cependant pas perçu par ce biais. L'image révèle en revanche, de nombreuses différences de détail entre les tracés des limites de ces mêmes formations géologiques, respectivement issus de l'image et de la carte (fig. 2a et 2b).

Il n'est toutefois pas constaté de correspondance univoque entre couleurs (c'est-à-dire taux d'humidité et radiométrie des sols) et formations géologiques. Par exemple, au nord est du granite de Lizio, les parcelles de couleur verte correspondent à des formations pliocènes à sables, graviers et poudingues et non à des granites. De fait, sur le terrain, les deux types de sols correspondant sont légers, doivent se ressuier dans des délais équivalents et ont donc une radiométrie proche dans le canal MIR. L'image souligne également l'existence de nombreuses anomalies, sols nus verts sur les formations schisto-quartzitiques paléozoïques et sols nus bleus sur les formations granitiques ainsi que la présence de sols nus de couleur identique, bleu pâle, sur les deux types de formation.

La végétation introduit de nombreuses discontinuités dans la perception des sols nus. Si les effets de l'agriculture ne sont pas trop pénalisants, compte tenu de la date de prise de vue (mi-mars), ceux de la végétation naturelle le sont localement beaucoup plus, notamment au sud de l'image. Deux types de perturbation peuvent être cités en exemple : il s'agit d'abord de l'unité vert émeraude située dans l'angle sud-est de l'image, qui correspond à une étendue de landes de fougères denses dont la radiométrie mime celle d'un sol sec ; il s'agit ensuite des tâches vert sombre à noires, correspondant à des forêts de feuillus, qui émaillent le massif des Landes de Lanvaux et gènent la perception de la limite entre le granite de Lanvaux au sud et les schistes paléozoïques au nord.

Les traitements de type classification et ratio (pl. 1b et 1c)

Ces traitements ne permettent pas un tracé continu des limites des massifs mais confirment les principaux traits de l'interprétation : tant la classification que le ratio révèlent les unités granitiques au sein des formations schisteuses. Ils signalent en outre des anomalies qui correspondent à des sols "humides" (plages respectivement vertes et bleu) au sein des granites et à des sols "secs" (plages respectivement mauves et rouges) au sein des schistes briovériens ou paléozoïques. Ils révèlent enfin les formations pliocènes situées dans l'angle nord-est de l'image.

Radiométrie et composition des sols

La nature des problèmes posés a rendu nécessaire une analyse du sol des parcelles radiométriquement les plus caractéristiques des différentes unités rencontrées, essentiellement les leucogranites d'Allouestre, de Guehenno et de



Fig. 2. – Comparaison de la carte géologique existante (a) et de celles obtenues par classification (b) et par calcul du ratio MIR/V (c).

1 : Pliocène, 2 : Schistes paléozoïques, 3 : Métamorphisme de contact, 4 : Schistes briovériens, 5 : Granite d'Allouestre, 6 : Granite de Bignan, 7 : Granite de Géhéno, 8 : Granite de Lizio, 9 : Granite de Lanvaux, 10 : Sols humides, 11 : Sols secs.

Fig. 2. – Comparison of the existing geological map (a) to those obtained by classification (b) and by calculation of the MIR:G ratio (c).

1: Pliocene, 2: Paleozoic schists, 3: Contact metamorphism, 4: Brioverian schists, 5: Allouestre granite, 6: Bignan granite, 7: Géhéno granite, 8: Lizio granite, 9: Lanvaux granite, 10: Wet soils, 11: Dry soils.

Lizio, le granite de Lanvaux, les schistes et grès paléozoïques et les schistes briovériens. 24 échantillons ont été prélevés et traités du point de vue de la granulométrie (5 fractions, dont les argiles), l'humidité équivalente, les matières organiques et enfin, le fer. L'analyse des résultats a été réalisée après regroupement, pour chaque échantillon, des éléments minéraux implicant une forte rétention en eau, à savoir les argiles et les limons fins (éléments $< 20 \ \mu m$). Elle consiste à comparer le contrôle des facteurs d'humidité sur l'humidité effective des sols ainsi que l'influence de cette dernière et de celle du fer sur la radiométrie résultante.

Les graphiques obtenus (fig. 3) appellent plusieurs commentaires :

– les sols sur granites sont regroupés vers les basses valeurs d'humidité alors que les sols sur schistes (briovérienspaléozoïques) le sont vers les hautes valeurs (fig. 3a). La plus forte teneur en argile des derniers par rapport aux premiers peut justifier cette répartition,

- l'ajout de la matière organique comme facteur d'humidité (fig. 3b) ne change pas fondamentalement la dispersion des sols, ce qui tend à prouver dans ce cas l'influence prépondérante du sous-sol,

- parallèlement, la comparaison des valeurs numériques des critères analysés et de celles de la radiométrie des parcelles correspondantes sur l'image montre, pour le canal 5, une dispersion importante, sur plus de trente niveaux, avec une concentration des granites sur les plus fortes valeurs (fig. 3e). Cette dispersion va décroissant pour le canal 4, moins de trente niveaux, avec une répartition des réponses plus homogène (fig. 3d) ; pour le canal 2, une dizainc de niveaux est seulement observée, les granites restant concentrés vers les valeurs moyennes (fig. 3c) ; enfin, à titre indicatif, ne sont notés que 5 niveaux pour le canal 6, ce qui semble correspondre à une homogénéisation de la réflectance, due à l'éclairement solaire (fig. 6f).

Cette analyse montre que les rapports entre l'humidité des sols et leur radiométric peuvent être utilisés, au moins localement, à des fins de discrimination lithologique, si toutefois un étalonnage terrain détaillé est réalisé.

Il résulte également que les deux canaux TM5 et TM 2 semblent les plus caractéristiques, ce qui confirme les considérations émises précédemment. Le ratio TM5/TM2, comparés aux facteurs d'humidité (fig. 3g et h) permet d'obtenir un regroupement très net des sols sur granites vers les fortes valeurs du premier et faibles valeurs des seconds, alors que les sols sur schistes se regroupent à l'inverse.

Nature des unités cartographiées par télédétection

Les analyses des sols confirment donc que l'information radiométrique extraite de l'image, notamment du canal MIR, est bien corrélée avec l'état d'humidité des sols nus visibles à la date de prise de vue. Cet état d'humidité est en partie révélateur des roches sousjacentes, par le biais de leurs produits d'altération (quantité plus ou moins forte d'argile et de limons). Il permet, dans l'exemple présenté, de distinguer nettement les unités leuco-granitiques de leur encaissant briovérien.

Classification et ratio soulignent en outre la présence d'unités à faible taux d'humidité au sein du Briovérien, dont celles situées au nord du granite de Lizio sont les plus nombreúses. Elles correspondent, selon la carte existante, aux formations détritiques pliocènes déjà mentionnées dont la composition, sablograveleuse, pourrait justifier une humidité, et donc une radiométrie, proche de celle des sols sur granites. A l'inverse, des zones à fort taux d'humidité, qui seront explicitées par les travaux de terrain, sont mises en évidence à l'intérieur des formations granitiques.

Bien évidemment des sols radiométriquement "secs" pourront exister au sein du Briovérien, sans pour autant qu'il s'agisse de matériel allochtone : ils pourront traduire des passées plus gréseuses ou la présence de fractures ou de filons (quartz ou roches éruptives) qui modifieront localement la perméabilité et donc la radiométrie des sols surincombants. Par ailleurs, les formations schisteuses paléozoïques se différencieront mal des schistes briovériens à cause d'un comportement très proche par rapport à l'humidité, comportement justifié par une teneur en argile équivalente. Seule une structuration diffèrente permet de les distinguer sur l'image.

Dans tous les cas, il reste que le caractère statistique de ce type d'approche, la résolution spatiale et spectrale du capteur utilisé et la variabilité des phénomènes naturels feront apparaître des variations qu'il ne sera pas toujours simple de relier à des phénomènes géologiques.



Planche 1. – Compositions colorées montrant l'intérêt du canal MIR (1,55-1,75 µm) a : image (4-5-2) ; b : classification (4-5-2) ; c : ratio MIR/V.

Plate 1. – Coloured compositions showing the interesting features of the MIR channel (1.55 $1.75 \mu m$)



Fig. 3. - Analyse statistique des relations entre la granulométrie des sols nus, leur humidité et leur radiométrie. g : granite, b : briovérien, p : pliocène.

Fig. 3. – Statistical analysis of the relationship between the grain-size distribution within the bare soil, its moisture and its electro-magnetic reflectance characteristics. g: granite, b: brioverian, p: pliocene.

Validation terrain

La correspondance entre les limitesimage établies au cours de l'analyse visuelle des différents documents et les contacts géologiques observés sur le terrain a été étudiée à partir de quelques 124 points d'observation dont 55 réservés aux seuls contacts leucogranitesschistes, compte tenu de leur importance sur la zone étudiée. Ces points ont été définis aléatoirement comme l'intersection des routes carrossables et des limites image ou carte.

La pertinence des données satellitaires interprétées a été évaluée par comparaison à celles de la carte géologique existante, qui constitue généralement le document de départ du géologue cartographe : en chaque point d'observation, les distances entre contact géologique et limite interprétée et contact géologique et limite cartographique ont été mesurées dans les mêmes conditions.

Ces valeurs, relatives aux trois massifs de leucogranites, ont été distribuées selon les cinq classes suivantes, 0 -50 m, 51 - 100 m, 101 - 150 m, 151 -200 m et > 201 m. La première de ces classes correspond à l'ordre de grandeur de précision de la correction géométrique de l'image (1,5 pixel soit 45 m) et la seconde à celui de la cartographie de terrain en condition d'observation des seuls indices de surface, condition habituelle en région Bretagne où les affleurements sont rares : sur l'ensemble des 124 points observés, des contacts nets ont été vus 15 fois et, sur les 55 points relatifs aux seules limites granitesschistes, 10 fois seulement.

Le tableau 1 montre la répartition de ces distances et confirme que, dans le cas présenté, une meilleure précision est à attendre de l'image que de la carte existante. En effet une limite sera considérée comme précise lorsqu'elle se situera dans une fourchette de 0 à 100 m (soit de 0 à 3 pixels) par rapport à la réalité du terrain. Selon les mesures effectuées, seuls 46 % des contacts relevés sur la carte à 1/80 000 sont situés dans cette fourchette contre 73% relevés sur l'interprétation. En outre les distances les plus élevées, supérieures à 200 m diminuent de plus du tiers, de 23 à 7 %.

Distances (m)	Limites image et affleurements	Limites carte et affleurements
0 - 50	62 %	36 %
51 - 100	$11 \ \%$	10 %
101 - 150	16 %	14 %
151 - 200	15 %	6 %
> 201	7 %	23 %

Tabl. 1. – Répartition des distances entre limites-images, limites-carte et affleurements relatives aux contacts leucogranites/schistes briovériens.

Tabl. 1. – Distribution of the distances between the image-determined boundaries, map boundaries and outcrops concerning contacts between Brioverian leucogranite and schist.

Ces résultats encourageants sont à tempérer par des résultats localement plus mitigés, principalement quant à l'analyse de la classification et du ratio. Ces traitements font ressortir des sols classés "humides" dans des zones à substrat granitique ou, à l'inverse, des sols classés "secs" dans des zones à substrat schisteux :

- sur le terrain, le premier type d'anomalies correspond le plus souvent à la présence de végétation pérenne (forêt de feuillus et résineux mélangés) ou plus localement à celle de fonds de vallons plus humides. Cette explication non liée à la géologie est satisfaisante compte tenu de l'homogénéité des massifs.

- le second type présente plusieurs manifestations dont les causes sont très disparates, géologiques ou non : 1) à l'angle sud-est de l'image, une unité allongée correspond à la présence d'une lande à fougères sèches à l'époque de la prise de vue dont la radiométrie est similaire à celle de sols secs, 2) à l'angle nord-est, est mis en valeur un ensemble de petites unités qui trahissent des formations pliocènes sablo-graveleuses perméables, 3) de façon plus dispersée, se développent de petites unités de sols "secs" où se manifeste l'influence de la morphologie (pentes où le ressuillage est plus rapide), 4) de même, la présence de filons de quartz ou de roches éruptives peut perturber localement le comportement des sols. De fait, des sols à forte densité de quartz filonien ou de granites altérés en volantes ont été observés localement loin des massifs granitiques proprement dits.

Plusieurs enseignements peuvent, en conclusion, être tirés des travaux de terrain :

- l'interprétation visuelle de l'image en fausses couleurs 452 donne une bonne image de la réalité géologique. Elle présente en outre une plus grande homogénéité et une plus grande précision que celle résultant des autres traitements. La prise en compte par l'interprétateur des informations morphologiques et le suivi d'un raisonnement géologique expliquent sans doute cette différence,

– l'utilisation anthropique inhomogène du sol est un facteur limitant majeur de la fiabilité de l'image pour la cartographie des formations géologiques basée sur l'analyse radiométrique des sols. Le granite des Landes de Lanvaux et les sables et graviers pliocènes d'un moindre intérêt agricole et relativement plus couverts par la végétation pérenne (landes, forêts) en sont un bon exemple : la vision des sols nus y est beaucoup plus discontinue et la perception des objets géologiques en est affectée,

– la perception des entités morcelées ou de petite taille se révèle délicate, car elles sont difficiles à distinguer de variations locales de radiométrie non liées à la géologie. Les formations pliocènes en sont un exemple.

Conclusions

L'analyse fine de la morphologie, réalisée à partir de données aéroportées ou satellitaires, constitue le plus souvent, en milieu couvert, l'apport essentiel de la télédétection au géologue cartographe. Celle des données radiométriques paraît toutefois la compléter utilement, lorsque peut être établie une relation entre la réponse spectrale des sols nus et les formations géologiques sous-jacentes.

Dans l'exemple pris en Bretagne centrale, région d'Elven, la bande du moyen infra-rouge (1.55-1.75 μ m), qui correspond au canal 5 du capteur Thematic Mapper de Landsat V, permet de réaliser une zonation des sols nus, basée sur leur état d'humidité. Celle-ci, qui s'avère, pour une grande part, fonction des matériaux d'altération de la roche mère sous-jacente, permet de proposer au géologue cartographe, après une validation précise in situ, une esquisse lithologique prévisionnelle de la région concernée, susceptible de guider et d'accélérer la cartographie de détail.

Si des erreurs d'interprétation géologique s'introduisent inévitablement du fait de la convergence possible du comportement hydrique de sols différents et de l'influence de l'action anthropique, le tracé des limites des unités radiométriques n'en constitue pas moins un support intéressant dans un contexte défavorable quant à l'accessibilité aux affeurements : 73 % des mesures de validation (sur 124 au total) effectuées sur le terrain ont montré un écart inférieur à 100 m entre la position des affleurements et les limites extraites de l'image. Une telle distance est considérée comme précise lorsque la cartographie géologique est effectuée, comme souvent en milieu couvert, au moyen d'indices de surface (pierres volantes par exemple). Ce pourcentage est à comparer aux 43 % constatés sur la même zone lors de l'utilisation de la carte géologique ancienne disponible, qui sert habituellement de document de base au géologue cartographe.

Une telle approche ne prétend pas expliquer toutes les variations radiométriques ni leur trouver une cause géologique. Toutefois, située en phase amont, et venant compléter l'interprétation morphologique, elle paraît constituer une source d'information indirecte pertinente à la disposition du géologue cartographe en région couverte, ce d'autant que l'infrastructure géologique de la zone étudiée sera limitée.

Remerciements

Cet article est la publication scientifique n° 93055 du BRGM ; il a été réalisé dans le cadre d'un projet financé sur crédits de recherche du BRGM. Les auteurs remercient MM. A. Autran, J. Chantraine et Ph. Dutartre pour leurs critiques et conseils au cours de la rédaction.

Références bibliographiques

BEDIDI A. (1992). - Comportement spectral (VIS-NIR) des sols latéritiques mouillés. Modèle de diffusion optique. Thèse Univ. Paris VII, 202 p.

BRAUX Ch., CASSARD D., DELPONT G., BONNEFOY D., CORPEL J., LAGNY Ph. (1991). – Identification de secteurs à vocation aurifère dans un couloir tectonique régional par interprétation de données satellitaires, géologiques et géophysiques intégrées dans un système d'information géographique. L'exemple du cisaillement sud-armoricain (France). *Chron. Rech. Min.*, n° **505**, pp. 19-34.

CASSARD D., CHANTRAINE J. (1990). – Commentaires de la carte de synthèse à 1/320 000 de la partie méridionale du Massif armoricain. Rapport BRGM inédit n° R30006.

COUREAU D. (1989). – Etude de la dégradation de la surface des sols par télédétection: analyses spectrales spatiales et diachroniques. Thèse Univ. Paris VI. *Revue Sols, INA-PG*, **17**, 239 p.

ESCADAFAL R. (1989). – Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Thèse Univ. Paris VI. Ed. de l'Orstom, coll. Etudes et Thèses, 317 p.

RIAZA GARCIA A. (1992). – Reflectancia en rocas en funcion de su litologia y fabrica interna. II.Cartografia de rocas igneas en el complejo de Burguillos de Cerro en el visible e infrarojo cercano : reflectancia espectral en laboratorio y evaluacion estadistica de la misma en relacion con imagenes Thematic Mapper. *Boletin geologico y minero*, **103-3**, pp. 411-434.

LOUHALA S. (1989). – Signatures spectrales de roches en milieu tempéré. Valeurs réelles et valeurs percues par le satellite. Thèse Univ. Paris VII. Document du BRGM n° 168, 205 p.

STONER E.R., BAUMGARDNER M.F. (1981). - Characteristic variations in reflectance of soil surface. Soil Sci. Soc. Am., 45, pp. 1161-1165.