

Cartographie géologique en Velay : aspects méthodologiques de l'étude par télédétection et présentation des résultats *

Geological mapping in Velay : methodological aspects and results of the remote-sensing study

Jean-Paul DEROIN ⁽¹⁾, François GIRAULT ⁽¹⁾, Olivier ROUZEAU ⁽¹⁾
et Jean-Yves SCANVIC ⁽¹⁾

Mots-clés : Télédétection spatiale, Cartographie, Faille, Structure annulaire, Anomalie thermique, Périglaciaire,
Morphologie volcan, Caldeira.
Massif central, Velay.

Résumé

Dans le cadre des projets scientifiques du BRGM, on a exploré une méthodologie d'utilisation de la télédétection pour des applications en cartographie géologique sur le Velay (Massif central), en particulier à l'échelle du 1/50 000.

Cette recherche aboutit à des propositions méthodologiques et des résultats cartographiques. Ces derniers sont compilés sur une maquette à 1/250 000 présentant le réseau de la grande fracturation pour l'ensemble du Velay, et sur les fonds topographiques à 1/50 000 pour les coupures Privas et Yssingeaux.

Concernant les méthodes, on insiste sur la stéréoscopie, peu employée en télédétection spatiale pour des raisons de coût, ainsi que sur le rapport résolution spatiale/résolution spectrale, jusqu'à présent étudié sous ses aspects théoriques, et qui intervient sur la précision de l'interprétation.

Les apports cartographiques sont de nature lithologique ou structurale. On insiste sur la signification lithologique de certaines réponses spectrales dans le domaine optique, en particulier celles de dépôts périglaciaires et d'horizons pédologiques associés, soulignées également par l'information thermique. Une réflexion est engagée sur certains aspects tectoniques, étayée par les travaux antérieurs : extension de la faille de Villefort au nord de Langogne, axe thermique N 120° du massif des Coirons, relation volcanisme et discontinuités-image. Enfin, on propose que la structure circulaire de Rochessauve, bien marquée sur les images-satellitaires, est induite par l'existence d'une caldeira.

Abstract

Research was carried out, under a BRGM scientific project, into a methodology of using remote sensing for geological mapping in Velay (Massif Central, France) in particular at 1:50,000 scale. This research led to recommendations being made concerning the methodology, whereas the mapping results were compiled into a 1:250,000-scale presentation of the major fracture network for the whole of Velay, as well as being plotted on 1:50,000-scale topographic bases for the Privas and Yssingeaux sheets.

With regard to the methodology, stress is laid on the availability stereoscopy which has been little used in satellite remote sensing due to the cost, and on the spatial resolution to spectral resolution ratio which has so far only been studied from a theoretical standpoint but which is very important in relation to the accuracy of interpretation.

The contribution of remote sensing to geological mapping is of a lithological or structural nature. Consideration is given to the lithological significance of certain spectral responses in the optical field, in particular those for periglacial deposits and associated pedological horizons which are supported by thermal data. A reflection is made concerning certain tectonic aspects supported by earlier work; e.g.; the extension of the Villefort fault to the north of Langogne, the N 120° thermal axis of the Coirons Massif, and the relationship between volcanism and image discontinuities. Finally, it is suggested that the Rochessauve circular structure, which is very apparent on the satellite images, reflects the existence of a caldera.

* Manuscrit reçu le 3 mars 1992, accepté le 11 janvier 1993.

(1) BRGM, Service géologique national, département Télédétection, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2.

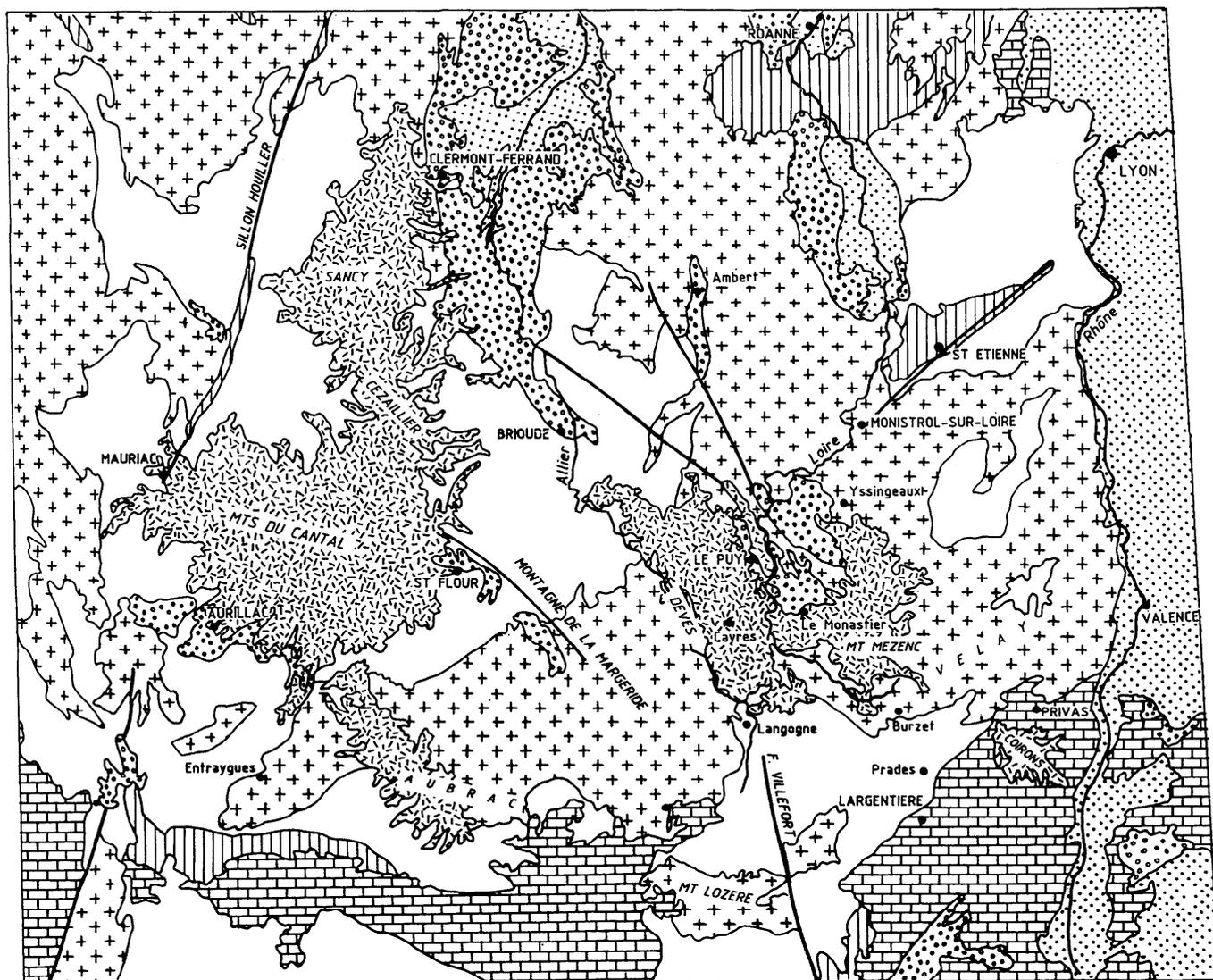
Le massif du Velay (France) est l'objet au BRGM d'un projet de recherche associant diverses méthodes et techniques de cartographie géologique et structurale (fig. 1). Une partie du projet, faisant l'objet d'un financement du fonds de Recherche scientifique, explore une méthodologie d'utilisation de la télédétection en appui aux levés géologiques, en particulier à l'échelle du 1/50 000, en pays d'affleurements masqués par un couvert végétal et un horizon de formations superficielles. On présente le bilan de cette recherche qui débouche sur des propositions méthodologiques et des résultats de cartographie géologique et structurale.

Développements méthodologiques

Actuellement, on peut disposer pour certaines régions du globe de plusieurs types de données numériques de télédétection et les logiciels de traitement de l'image sont suffisamment développés pour en valoriser le potentiel. On a exploré cette gamme de possibilités sur le Velay dans les conditions opérationnelles des levés réguliers à 1/50 000.

Les données utilisées proviennent de radiomètres embarqués sur des satellites d'observation de la terre opérationnels, HRV (Haute Résolution Visible) de Spot, TM (Thematic Mapper) de Landsat, ou expérimentaux, HCMR (Heat Capacity Mapping Radiometer) du satellite HCMM (Heat Capacity Mapping Mission). Ces radiomètres offrent un éventail de caractéristiques spatiales, résolution de 10-20 m (Spot), 30-120 m (Landsat) et 500 m (HCMM), ainsi qu'une gamme spectrale

-  Miocène-Pliocène-Quaternaire
-  Volcanisme cénozoïque
-  Bassins oligocènes
-  Couverture mésozoïque
-  Permo-carbonifère
-  Granite
-  Socle métamorphique



Extrait de la carte géologique de la France à l'échelle 1/1 000 000 - Edition BRGM

Fig. 1. - Esquisse géologique régionale d'après la carte à 1/1 000 000.

Fig. 1. - Regional geological sketch map (after the 1: 1,000,000-scale map).

allant du visible à l'infrarouge thermique. Sur les régions d'Yssingeaux et Privas, à l'échelle de 1/50 000, ou à 1/250 000 sur l'ensemble du massif, l'interprétation des différentes données permet d'en préciser les conditions d'utilisation.

Les observations faites au cours de cette étude montrent qu'il peut être intéressant, malgré la complexité des réponses quant à leur signification lithologique, d'optimiser par traitement numérique les différences spectrales, dont on suppose qu'elles traduisent, dans le paysage, certains objets géologiques. Sur le Velay, on a évalué l'apport géologique des différentes bandes spectrales entrant dans les compositions colorées. On a sélectionné les valeurs enregistrées dans la gamme du moyen et proche infrarouge, particulièrement les canaux 5 [moyen infrarouge], 4 [infrarouge] et 2 [vert] de Landsat TM (Thematic Mapper). Ceci a permis de souligner l'extension de formations géologiques reconnues localement sur le terrain, surtout lorsqu'on a mis en œuvre des traitements numériques, tels des étalements de dynamique de type "sinusoïdal" qui accentuent certains contrastes. Enfin, même si la résolution spatiale du radiomètre thermique de Landsat TM n'est que de 120 m, l'étude des réponses obtenues dans cette gamme spectrale révèle un potentiel qui est à la base de différenciations de nature lithologique et structurale.

Toutefois, dans les conditions d'affleurement connues en Velay, les unités cartographiques sont généralement révélées par la combinaison des caractéristiques spectrales, texturales et morphologiques qui permettent de définir les "unités de paysage" (Deroin, 1990). On observe alors l'existence de seuils critiques au-delà desquels la perception des formes et des textures l'emporte sur celle des valeurs spectrales. Ces valeurs ne peuvent émerger du fond parce que la taille des objets qui les induisent est trop petite et la "pollution" du signal liée à l'environnement terrestre, trop forte. Ainsi, lors de l'étude à 1/50 000 (Privas, Yssingeaux), on a constaté que le nombre et la qualité des observations faites dans les formations volcaniques étaient plus élevés sur les images Spot, au spectre restreint mais à haute résolution spatiale (20 m), que sur les images Landsat TM, au spectre élargi au moyen infrarouge mais à résolution spatiale inférieure (30 m) ; cependant, cette "loi" ne peut être généralisée.

Enfin, il faut une fois encore souligner, à la suite de nombreux géologues (par exemple Chorowicz *et al.*, 1991) que la perception du relief pèse d'un poids important sur l'interprétation géologique des images. Elle seule permet de prendre en compte la position relative des objets dans l'espace et d'éviter ainsi des amalgames entre faciès spectralement identiques, mais d'âge ou de position différents. Elle permet aussi d'identifier, grâce à leur morphologie et aux conditions d'environnement, des objets géologiques tels que les alluvions, les terrasses, les colluvions, etc., ou des phénomènes les affectant : glissements de terrain, etc., et d'apprécier le sens et la valeur des pendages en milieu sédimentaire. Cependant, si on utilise comme support d'interprétation un seul couple d'images restituées sous un format géométrique compatible avec la sauvegarde de la stéréoscopie, on crée un document non superposable aux cartes de référence et il faut le corriger par infographie. Cette correction géométrique appliquée *a posteriori* n'est pas la plus performante ; on a cherché

à y remédier en calculant, lorsque cela a été possible en Velay (Yssingeaux - Le Puy), à partir des données Spot, un modèle numérique de terrain (MNT) dont l'équidistance des courbes de niveau est de 40 m. Ce fichier représentatif du relief s'inscrit dans un système de projection cartographique défini. Il permet de corriger parfaitement les données Spot et de créer une ortho-image de référence. Enfin, grâce au logiciel spécialisé Vue 3D, développé par la société ISTAR, le MNT permet de réaliser une image oblique virtuelle dont l'angle est choisi par l'utilisateur ; elle assure la vision stéréoscopique avec l'ortho-image dont elle dérive. On atteint ainsi un excellent niveau de qualité géométrique, ce qui est nécessaire dans la perspective de l'intégration des données dans les systèmes d'informations géologiques que l'on développe actuellement, et où la télédétection a sa place.

Résultats cartographiques

Les radiomètres satellisés de seconde génération confèrent à la télédétection spatiale un grand potentiel cartographique. Même si l'utilisation de telles données n'est pas encore généralisée, elle s'avère valable aux échelles moyennes de type 1/50 000 et aussi 1/25 000 (Mékarnia et Chorowicz, 1991).

En phase préparatoire aux levés, l'intérêt de la cartographie que l'on peut réaliser avec les seules images, et caler sur des documents d'archive pour la renseigner et la rendre plus accessible, est parfois négligé. Elle permet pourtant d'influer sur le choix des coupes, les orientant vers des zones d'observation privilégiée et des cibles particulières : on parle aussi d'anomalies dont l'originalité — par rapport à la connaissance du terrain — éveille la curiosité scientifique.

À l'expérience des études par télédétection réalisées en appui à des cartographies sous toutes les latitudes, s'il apparaît que la méthodologie doit s'adapter aux conditions particulières de chaque levé, certains principes tels que l'instauration d'un véritable dialogue image-terrain et la systématisation de l'interprétation ne doivent pas être négligés ; ils permettent d'aborder la cartographie géologique d'une façon différente, souvent complémentaire aux travaux de terrain.

En phase de rédaction de la maquette géologique, la télédétection facilite l'intégration des différents levés, l'extrapolation de contours et la compréhension des relations entre les formations superficielles et le substratum. Ce dernier point prend une importance grandissante si l'on se place dans la perspective d'évolution de la cartographie, où les formations superficielles sont de plus en plus détaillées.

En Velay, la cartographie a été orientée vers la synthèse à 1/250 000 de l'ensemble du massif et les levés géologiques à 1/50 000. Ces préoccupations ont guidé la réalisation des documents de télédétection. L'analyse qui suit se réfère à la carte télé-analytique de synthèse (1/250 000) et aux esquisses cartographiques de Privas et Yssingeaux à 1/50 000, qui ont été réalisées à partir des données Landsat TM et Spot.

L'interprétation synthétique à 1/250 000 (fig. 2), numérisée, a été réalisée à partir d'une mosaïque

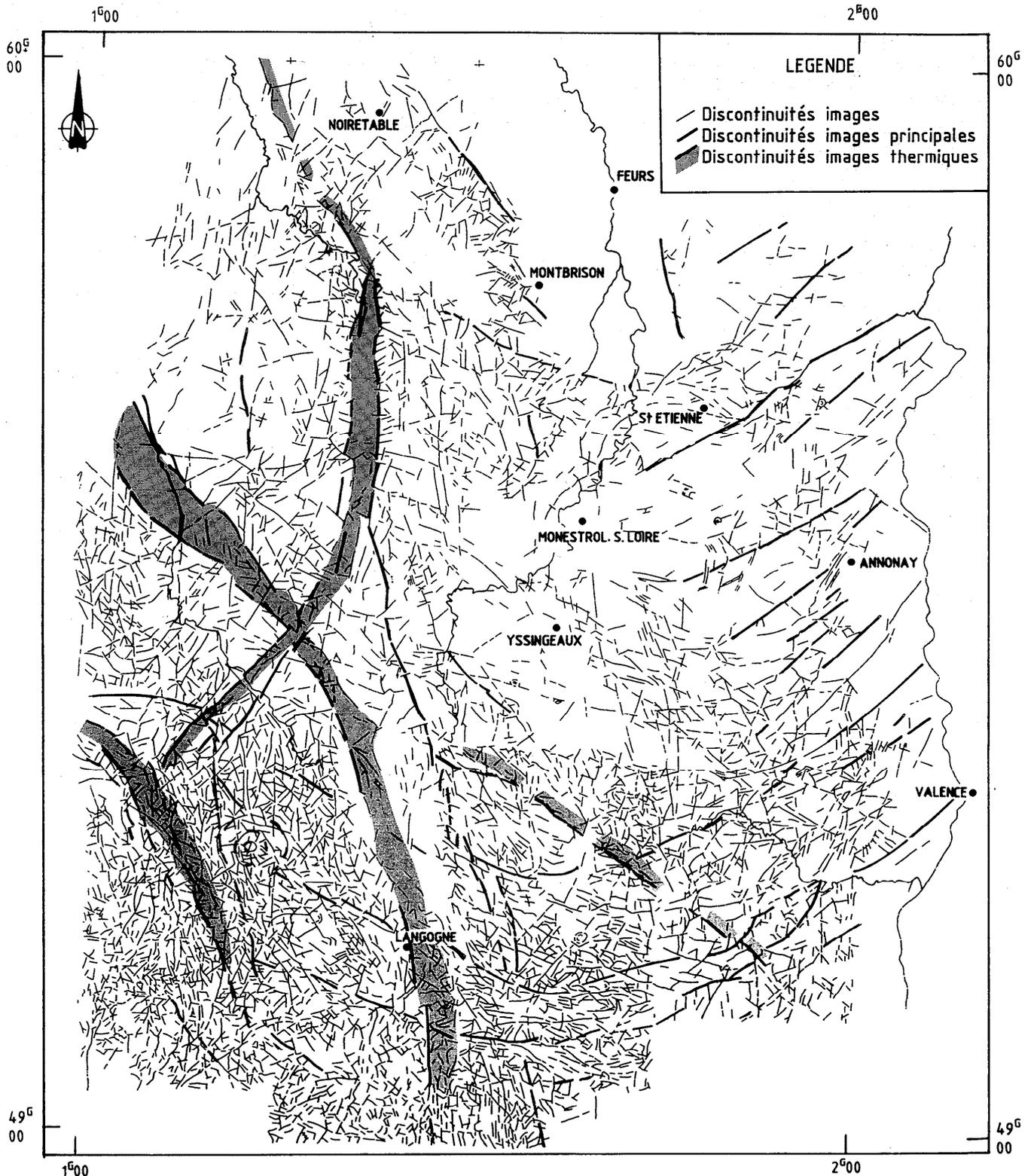


Fig. 2. - Massif du Velay - Proposition d'architecture à partir des données de télédétection.

Fig. 2. - The Velay Massif; proposed structure based on remote-sensing data.

d'images Landsat TM corrigée géométriquement. Elle a été orientée vers la cartographie des discontinuités-image qui traduisent une partie de l'architecture tectonique régionale et complètent l'observation sur affleurements. L'image qui en est donnée est très contrastée et fait ressortir des traits majeurs qui confirment et complètent la connaissance que l'on a du massif.

La bordure méridionale du massif du Velay

Au sud de l'image (fig. 3) plusieurs arcs emboîtés sont soulignés par des indicateurs morphologiques, notamment hydrographiques. Très nets à l'est de Lan-

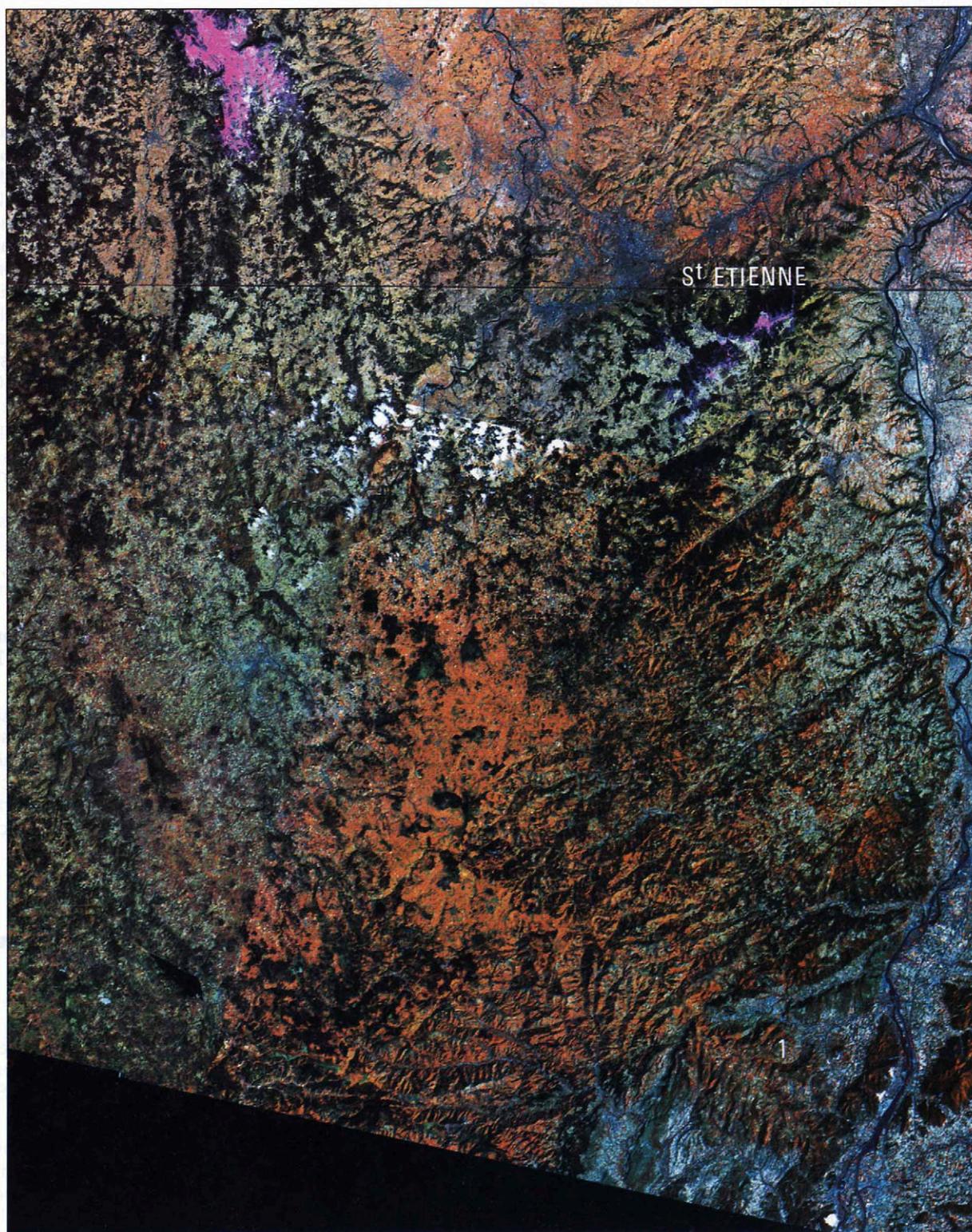


Fig. 3. - La mosaïque d'images TM du Velay.
Fig. 3. - Mosaic of TM images for Velay.

gogne où ils s'inscrivent dans la structure générale, ces arcs transparaissent à l'ouest de la faille de Villefort. La vue synoptique procurée par la mosaïque permet de proposer la continuité apparente de cette structure dans le massif granitique de la Margeride.

On a recherché la signification de ces observations dans l'histoire tectonique de la région et on peut proposer que les arcs emboîtés soulignent l'allure générale de la montée diapirique du granite du Velay. Leur prolongement avec la fracturation de direction NW-SE qui affecte le granite de la Margeride confirme cette hypothèse : fracturation à composante verticale, elle est généralement interprétée comme une manifestation postérieure à la mise en place du massif de la Margeride et contemporaine du diapirisme du granite du Velay, dont l'influence se ferait sentir sur une marge de 25 à 30 km (Dutartre, 1982). Enfin, on observe que les bassins stéphanien de Prades (au nord de Largentière) et miocène de Naussac près de Langogne, s'inscrivent le long d'accidents interprétés des images Landsat et appartenant à ce système NW-SE.

Extension de la faille de Villefort

Un second trait majeur de l'interprétation est le couloir de discontinuités subméridiennes, d'environ 15 km de large, visible au sud de Langogne (fig. 1 et 2). Ce couloir est limité, à l'ouest, par le prolongement septentrional de la faille de Villefort et, à l'est, par la faille de Langogne. Il se prolonge vers le sud jusqu'à Alès où il est plus resserré. Vers le nord, il apparaît dans la zone volcanique du Devès, puis il se sépare en deux branches: l'une s'infléchit vers l'ouest où elle débouche sur le bassin oligocène de Brioude, l'autre le poursuit selon la direction N-S où elle épouse les contours du bassin oligocène d'Ambert.

La faille de Villefort, aussi appelée "dislocation regordane", a eu un jeu décrochant senestre reconnu de longue date (Fabre, 1877), mais son importance reste discutée (Deroin, 1990 ; Deroin *et al.*, 1990). L'hypothèse la plus récente propose l'extension de cet accident en direction de l'anomalie magnétique du bassin de Paris (Prost et Becq-Giraudon, 1989). Cette dernière est souvent associée au sillon houiller (Burg *et al.*, 1990) dont le décrochement senestre apparent est du même ordre de grandeur (70-100 km). Sans prétendre résoudre ce problème de géologie structurale, l'étude par télédétection apporte des éléments qui doivent être considérés.

Le plateau du Devès entre les vallées de l'Allier, à l'ouest, et de la Loire, à l'est, s'inscrit entre deux discontinuités-image parallèles se situant dans le prolongement septentrional des failles de Villefort et de Langogne. On peut penser que ces formations volcaniques se sont mises en place à la faveur des accidents réactifs (Blès, inédit). Cette hypothèse est confortée par le fait que les cônes volcaniques qui constituent l'axe du Devès sont alignés sur des discontinuités-images N 160°, interprétées de la mosaïque Landsat, qui jouxtent l'extension vers le sud d'un accident cartographié sur la coupure à 1/50 000 Le Puy. On a ainsi un ensemble d'objets qui permet de valider l'information

spatiale et d'étendre à l'échelle régionale certaines observations du terrain.

Au-delà du Devès, le schéma se complique car si certains structuralistes suggèrent une poursuite de l'accident de Villefort en direction du bassin d'Ambert, solution *a priori* la plus logique, la télédétection conduit à proposer une autre alternative, en direction du bassin de Brioude. En effet, sur la carte des discontinuités-image, le faisceau de Villefort-Langogne se sépare en une branche orientale qui le poursuit vers le nord dans le bassin d'Ambert, et une branche occidentale qui s'infléchit vers le nord-ouest dans le bassin de Brioude. Mais, et c'est l'originalité de la télédétection, l'un des deux tracés suggérés par l'interprétation des données visibles, proche et moyen infrarouge, est privilégié par une réponse thermique marquée depuis Villefort jusqu'au bassin de Brioude. Cette réponse (points 2-5, fig. 4) est visualisée de façon nette sur l'image restituée de l'enregistrement effectué par le radiomètre HCMR, 500 m de résolution au sol, 0,4 °C de sensibilité thermique, embarqué sur le satellite HCMM. Ce type de réponse, révélant certains effets de la tectonique, n'est pas unique dans la région où plusieurs axes thermiques parallèles, dont un se suit selon la direction N 120° entre Margeride et Sancy, ont été décrits (points 3-4, fig. 4) (Scanvic, 1982 a et b). Cette répétition dans l'espace ne prouve pas la validité du phénomène, mais elle lui ôte tout caractère aléatoire, d'autant que d'autres discontinuités thermiques se corrélaient de façon remarquable avec certains traits tectoniques, comme le chevauchement nord-margeridien (De Gramont, 1990) en limite des micaschistes (points 6-7, fig. 4).

Enfin, pour terminer la description spatiale du faisceau de failles de Villefort, on rappelle que c'est sur les premières images Landsat MSS du Massif central qu'a pu être observée la continuité tectonique, depuis confirmée par les levés au sol, entre le bassin d'Ambert et la faille orientale de Limagne, à travers le Forez (Scanvic et Wecksteen, 1981).

Structure circulaire de Rochessauve

Dans le massif volcanique des Coirons, au sud-ouest de Valence, une structure circulaire caractéristique attire l'attention sur le village de Rochessauve. Les indicateurs de cette morphologie ont une certaine pérennité puisqu'on les retrouve sur les images Landsat MSS de 1976 et Landsat TM de 1984.

Plusieurs significations géologiques ont été proposées en raison de l'abondance des modèles. La mise en évidence d'indicateurs d'origine volcanique a permis d'avancer l'hypothèse d'une caldeira. Une autre hypothèse consiste à attribuer une origine météoritique à cette structure.

C'est sur le flanc nord-est du massif des Coirons qu'on observe la structure circulaire de 7 km de diamètre qui s'inscrit avec netteté dans la morphologie. Le cœur de la structure édifié dans les marnes valanginiennes est un relief ceinturé par une dépression bordée d'un escarpement. La disposition morphologique, si elle n'était dans un contexte volcanique, évoquerait l'effet d'un impact météoritique ; la lecture de la notice

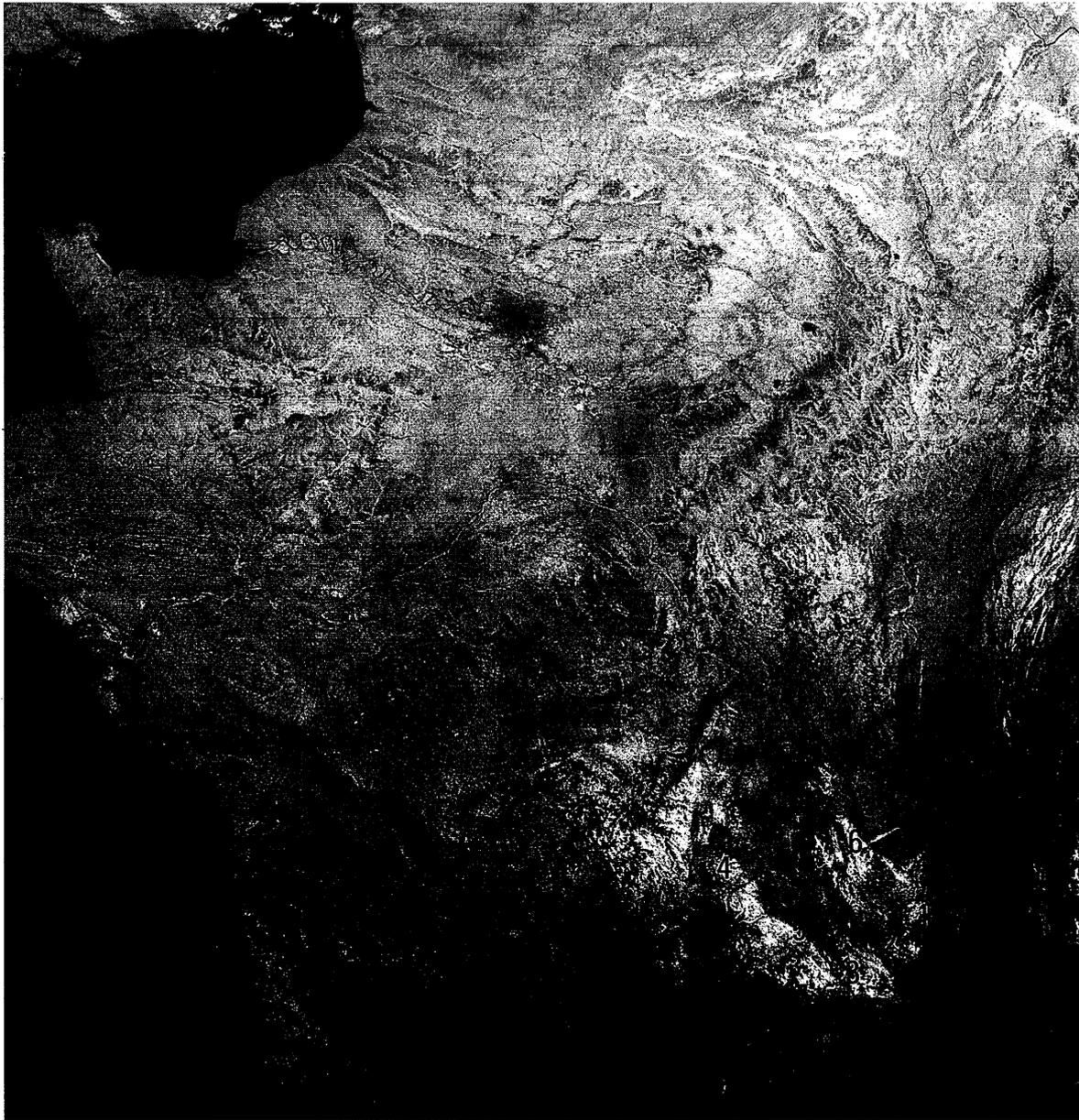


Fig. 4. - L'image thermique HCMM (nuit).

Fig. 4. - HCMM thermal image (night).

géologique de la carte à 1/80 000 suggère une autre hypothèse. Voici comment les auteurs décrivent le site :

“Comme dans toutes les régions volcaniques, les éboulis basaltiques occupent une place relativement importante dans certaines régions du Coiron. Il convient de signaler en particulier ceux de la région de Rochessaive. Ces derniers [constituent] de véritables falaises basaltiques, accompagnés par les tufs sous-jacents. On les rencontre à 200-300 m du plateau basaltique ; vu l'importance du déplacement latéral, on peut penser que ces éboulis sont la conséquence d'un accident important, tel un tremblement de terre, à une époque où l'activité volcanique n'avait pas totalement disparu de la contrée. Leur volume est considérable et, à première vue, ils pourraient être confondus avec des venues volcaniques en place”.

Ces observations associées spatialement à la structure visible sur les images satellitaires, l'existence signa-

lée (feuille à 1/250 000, Valence) de plusieurs dia-trèmes sur la bordure volcanique et l'évocation d'un maar à Rochessaive renforcent l'hypothèse d'une caldeira. D'autres arguments ont été recherchés ; l'un d'eux découle de l'analyse typologique sommaire de deux caldeiras du Massif central : l'amphithéâtre volcanique de l'Hôpital (feuille à 1/50 000, Roanne) et la caldeira du Sancy (massif du Mont Dore). Une autre caldeira, suspectée à partir de la télédétection, est localisée à Manzat (feuille à 1/50 000, Aigueperse) dans des ignimbrites (Scanvic, 1984).

La caldeira du Sancy s'est édifiée sur la bordure d'un horst individualisé à l'Oligocène (Varet *et al.*, 1980), d'orientation N-S, qui commence sous la chaîne des Puys et se poursuit sous le Cézallier. L'activité volcanique du Mont Dore s'est, en général, produite à l'intersection des fractures N-S avec des failles hercyniennes réactivées. La vision spatiale du massif s'accorde avec les observations faites sur le terrain ou par géophysique.

Elle permet de cartographier l'extension régionale des différents accidents, en particulier sur les images thermiques. Les différences de température enregistrées par le satellite HCMM restituent, avec netteté, une forme circulaire encadrée par des discontinuités d'orientation N-S, s'inscrivant dans un couloir de direction N 120°, de 10 km de large et 100 km de long, entre le Sancy et la Margeride (Scanvic, 1982 b).

L'amphithéâtre volcanique de l'Hôpital (feuilles à 1/50 000, Roanne et Le Mayet-de-Montagne) s'inscrit dans les formations effusives du Viséen où il dessine une structure circulaire d'une vingtaine de kilomètres de diamètre, formée de plusieurs anneaux (Bernard-Griffiths, 1965). Cette structure est associée à des accidents N 150°, N 120° et N 20°, et aurait une origine de type "caldeira". Sur les images Landsat MSS, elle apparaît sous la forme d'une structure elliptique d'une trentaine de kilomètres selon le grand axe N 120°, soulignée par le réseau hydrographique.

La structure de Manzat, région d'Aigueperse, a été reconnue par télédétection dans les formations volcaniques d'âge viséen supérieur (feuille à 1/50 000, Aigueperse), constituées de laves et surtout d'ignimbrites. Le cœur de cette structure hémisphérique est établi dans la formation de Manzat (tufs granitoïdes). L'anneau extérieur recoupe différents ensembles et en particulier, au nord-ouest, les tufs ignimbritiques à enclaves de la formation de Bussière. Pour les auteurs de la carte, la répartition d'ensemble des formations d'âge viséen supérieur obéit à une logique de remplissage d'un bassin, dont la formation de Manzat constituerait le niveau supérieur.

La structure révélée par l'interprétation des données Landsat (Scanvic, 1984) est associée à des accidents N 20° et N 60°. Ces directions ont été retrouvées sur le terrain. En s'en tenant aux études pétrographiques réalisées au cours de la cartographie géologique à 1/50 000, on ne peut affirmer ni exclure une interprétation de type "caldeira" qui serait alors le centre émissif recherché pour les volcanites observées dans la région. Même si cette hypothèse n'est pas actuellement retenue, elle mériterait d'être discutée.

Si l'on s'en tient à la typologie schématique des caldeiras reconnues sur le terrain (Sancy et Roanne), le seul caractère commun, et il est ténu, est l'existence des accidents d'orientation N 120°, les âges de mise en place étant tout à fait différents : oligocène pour la première, viséen pour la seconde. Cette direction est connue dans le massif des Coirons ; on discute ci-après son importance, en particulier du fait de sa réponse thermique.

Axe thermique des Coirons

On a rapporté l'existence d'axes thermiques révélés par la télédétection dans l'est du Massif central. Ces axes sont soulignés par des plages thermiques dont la température est sensiblement différente de celle de leur environnement. Axes chauds sur les images de nuit, ils traduisent un comportement hydrique particulier (Scanvic, 1982). Certains de ces axes, d'orientation N 110°/130°, soulignent des relations structurales

comme on l'a vu, d'une part, entre Margeride et Sancy et, d'autre part, entre le faisceau de Villefort et le bassin de Brioude.

Un de ces axes, orienté selon la direction NW-SE (feuille à 1/50 000, Privas) apparaît entre le massif des Coirons et Mézilhac (point 1, fig. 4). Il se poursuit vers le nord-ouest sur les feuilles à 1/50 000 de Burzet, Monistrol et Cayres. Une lecture attentive des cartes de référence et de l'esquisse réalisée à partir de l'image Landsat TM à 1/50 000 conduit aux remarques suivantes :

- un ensemble de discontinuités-images parallèles, discontinues, est observé sur les données de télédétection (Landsat) le long de cet axe thermique ;

- la faille de Saint-Martin-sur-Lévezou qui affecte les formations de l'Hauterivien (feuille à 1/50 000, Aubenas) se poursuit sur la feuille de Privas par un des éléments constitutifs de l'axe thermique des Coirons ;

- ces discontinuités sont inscrites dans les schistes et les granites qui affleurent à l'ouest de la feuille à 1/50 000 Privas ; elles sont interrompues — ou leur tracé s'infléchit — au passage d'accidents transverses N 20° ou N 60° ;

- dans la région de Saint-Priest-Gourdon, certains dykes de basalte sont orientés selon la direction du faisceau qui les englobe ;

- le massif des Coirons, les coulées de la serre de Suson, roc du Gourdon, serre de la Truche, mont Mézenc, serre de l'Areilladou, s'alignent sur cet axe ;

- certains cônes volcaniques à morphologie préservée, comme le volcan de Crau, sont nettement affectés par des accidents N 120°, visibles sur l'image Landsat TM ;

- des centres d'émission stromboliens et plusieurs maars s'alignent sur le massif des Coirons selon la direction N 120° (axe Prades-Vavernes).

Ainsi la discontinuité thermique révélée par l'image HCMM, grâce à une température apparente plus élevée que celle de son environnement, paraît correspondre à un accident d'ampleur régionale, affectant le socle, qui aurait favorisé la mise en place du volcanisme mio-pliocène lors de sa réactivation, en particulier aux croisements avec les accidents méridiens.

Réponse spectrale de phénomènes glaciaires et périglaciaires

La qualité de l'image MSS Landsat du 19 septembre 1976 et la pertinence des observations géologiques qu'elle permet, en font un document de référence pour le sud-est du Massif central (fig. 5). On a récemment étudié un faciès spectral particulier apparaissant sur cette image où la réponse est renforcée par un fort contraste avec le proche environnement (Deroin *et al.*, 1991 a et b ; Prost *et al.*, 1991). Ce faciès est localisé sur le mont Lozère, le plateau de l'Aubrac et le secteur de Sainte-Eulalie, au sud du Mézenc (faciès Burzet). Sur ces trois sites qui ont fait l'objet d'observations de terrain, il s'individualise à l'intérieur d'ensembles plus ou moins homogènes, granite du Lozère dont la cartographie a été corrigée (Prost *et al.*, 1991), roches volca-



Fig. 5. - L'image MSS Landsat du 19 septembre 1976. (1) Faciès Burzet et son environnement, (2) métamorphique, (3) volcanique, (4) faciès Aubrac, (5) faciès Lozère.

Fig. 5. - Landsat MSS image taken on 19 September 1976. (1) Burzet facies and environment, (2) metamorphic, (3) volcanic, (4) Aubrac facies, (5) Lozère facies.

niques de l'Aubrac et du Devès. L'indicateur principal en télédétection est une pelouse affectée par la période de sécheresse qui a précédé l'acquisition. On a recherché la trace de ce faciès spectral sur des documents de télédétection acquis à différentes dates et avec des résolutions spatiales variées. On a constaté sa pérennité sur les images Landsat TM de juillet 1984 et Spot de septembre 1986, pour deux des trois sites ; le faciès Burzet fait exception.

Dans cette région, la réflectance élevée qui caractérise le faciès Burzet permet de le différencier, sans ambiguïté, des roches du socle, affleurantes au nord et au sud (fig. 5, n° 1, 2 et 3) ; mais, à l'inverse, elle introduit une confusion en gommant sa limite occidentale. De fait, sur les images du visible, proche et moyen infrarouge, le faciès Burzet apparaît comme la terminaison orientale du plateau volcanique du Devès, et non plus comme une entité distincte.

C'est à ce point qu'apparaît l'intérêt de l'analyse multispectrale puisque sur l'image thermique Landsat de juillet 1984 (résolution spatiale 120 m) le faciès Burzet réapparaît dans son intégralité. Il est souligné par une plage de température de surface plus élevée que celle de l'environnement, à l'ouest en particulier, confortant ainsi les observations faites sur l'image Landsat MSS de 1976. Cette réponse thermique serait induite par une différence de capacité de rétention en eau des sols, ceux constituant le faciès Burzet étant probablement plus perméables.

A ce stade d'observation et d'hypothèse le retour aux cartes géologiques (feuilles à 1/50 000, Burzet et 1/80 000, Le Puy) nous apprend que ce faciès se développe aussi sur les coulées basaltiques du Devès et que les dépôts glaciaires wurmiens et villafranchiens reconnus sur le terrain y sont plus abondants. Il paraît plus probable d'attribuer la réponse spectrale à l'action de la dynamique glaciaire, comme on l'a prouvé sur le mont Lozère et l'Aubrac (Prost *et al.*, 1991).

Sur l'Aubrac, on observe une convergence partielle entre la réponse spectrale du faciès et les limites du plateau volcanique qui s'en dégage souvent largement. Les corrélations sont étroites avec les limites d'extension des glaciations du Würm et du Riss, si l'on se réfère à la carte des formations quaternaires (CNRS, 1974) et aux objets géologiques reconnus *in situ* : tills, moraines, blocs striés, blocs erratiques.

Sur le mont Lozère, l'étude interdisciplinaire supportée par l'imagerie satellitaire permet d'attribuer une origine périglaciaire au faciès spectral qui, sur ce site, est associé à ce qui était appelé jusqu'alors le granite du sommet de Finiels (Deroin *et al.*, 1991 b). La démonstration est basée sur la cartographie détaillée des granitoïdes, notamment de leur réseau filonien et de leurs enclaves, ainsi que sur des arguments morphologiques et botaniques.

Ainsi, dans les trois cas, on peut admettre que la réponse spectrale est induite par des différences de rétention en eau des sols et de qualité des pelouses naturelles qui résultent de phénomènes supergènes d'origine glaciaire et périglaciaire affectant le substratum. Ces phénomènes, bien observés en raison de leur ampleur au mont Lozère, compliquent les levés en Aubrac et à Burzet où les indicateurs spectraux correspondent à des objets géologiques discontinus.

Volcanisme et discontinuités-images

A l'échelle régionale, on a interprété de la mosaïque Landsat TM, en se calant sur les cartes géologiques, les formes volcaniques les plus caractéristiques dont on a étudié les relations avec les discontinuités-images. Même si les résultats d'une telle comparaison dépendent beaucoup de l'échelle d'étude, on constate l'existence d'une relation entre le volcanisme et les directions N 160°, N-S et N 120°, ce qui corrobore les observations de terrain (levés inédits de la feuille à 1/50 000, Yssingaux). L'analyse de cette même relation à une échelle plus grande a été entreprise pour les cartographies à 1/50 000 de Privas et Yssingaux à partir de l'interprétation des images Landsat TM et Spot en stéréoscopie.

Sur Privas, les épanchements basaltiques s'orientent selon trois directions principales N 120° (axe thermique décrit ci-dessus), N 60°, N 15°, et de façon moins nette, N 150°. Ainsi les volcans de Crau et d'Airac (région d'Antraigues) sont encadrés par des discontinuités N 120° et N 150°. On observe la trace de discontinuités-images plurikilométriques N-S, N 60°, N 120° au col de l'Escrinet, où pourrait être localisé le centre émissif du massif des Coirons.

Sur la feuille d'Yssingaux, il est difficile de préciser l'orientation générale des épanchements dont la surface est importante, mais ils semblent globalement orientés NW-SE parallèlement à la faille N 130° de Saint-Julien-Chapteuil qui les limite au sud-ouest, ainsi que sa réplique beaucoup moins nette au nord-est. Dans le détail, les volcans de différentes natures pétrographiques sont, pour la plupart, recoupés ou encadrés par des discontinuités N-S, N 160° et plus rarement N 120° et N 160°.

Conclusion

Le projet de cartographie géologique en Velay (volet télédétection) débouche sur des conclusions méthodologiques et des résultats cartographiques.

L'étude par télédétection a été réalisée à partir de données numériques de type visible, proche et moyen infrarouge, et infrarouge thermique. Ces données sont caractérisées par des résolutions spatiales variées et autorisent, pour certaines, la vision stéréoscopique. Elles ont été restituées sous la forme de compositions colorées, optimisées en mode interactif, qui ont servi de base à la photo-interprétation.

Cette interprétation a permis d'explorer en mode opérationnel l'intérêt, sur une région où les affleurements sont généralement masqués, de certains points de méthodologie. Il en ressort que :

- la résolution spatiale, la vision stéréoscopique et les caractéristiques spectrales des données Spot et Landsat sont des qualités essentielles justifiant l'utilisation de la télédétection dans les programmes de cartographie géologique ;

- les traitements d'amélioration spectrale peuvent, dans certaines conditions d'environnement, être inefficaces si la résolution spatiale n'est pas compatible avec

la taille des objets. Ces derniers sont souvent petits et la réponse est affectée par celle de leur environnement terrestre. Cette observation pose le problème, pour les nouvelles technologies d'acquisition à très haute résolution spectrale, de l'évolution conjointe des paramètres spectraux et spatiaux ;

— l'étude de l'évolution multitemporelle de la réponse des faciès a montré l'importance de l'époque d'acquisition et de la gamme spectrale utilisée. En particulier, on a pu confirmer que le domaine de l'infrarouge thermique, en général moins riche en informations de nature géologique, caractérisait de façon prépondérante la réponse de certains objets, discontinuïtés ou faciès, lorsque leur capacité de rétention en eau devenait un indicateur déterminant.

On notera que le support à l'interprétation sous le stéréoscope pourrait être amélioré jusqu'à un haut niveau de qualité géométrique en réalisant, à partir d'un modèle numérique de terrain, une ortho-image verticale et une ortho-image oblique virtuelle. Ce couple d'images, découpé selon un format utilisable sous le stéréoscope, permet l'interprétation dans un référentiel géocodé, en conservant la perception du relief.

Références bibliographiques

BERNARD-GRIFFITHS J. (1965). - Étude des terrains primaires et des microgranites dans la région de Saint-Just-en-Chevalet (Loire). Thèse 3ème cycle, université de Clermont-Ferrand, 252 p.

BURG J.-P., BRUN J.-P., VAN DEN DRIESSCHE J. (1990). - Le Sillon Houiller du Massif central français : faille de transfert pendant l'amincissement crustal de la chaîne varisque ? *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **311**, (2), pp. 147-152.

CHOROWICZ J., DEROIN J.-P., GESS G., HUGER J., BECUE B., CURNELLE R., PERRIN G., RONFOLA D. (1991). - A methodology for the use of the Spot Imagery in oil exploration. Example of the Bas-Languedoc exploration permits area (France). *Int. J. Remote sensing*, **12**, n° 10, pp. 2087-2108.

C.N.R.S. (1974). - Carte géologique du Quaternaire et des formations superficielles. *Ann. sci. univ. Besançon*, feuille SE.

DE GRAMONT X. (1990). - Synthèse du district Brioude-Masiac et des confins nord de la Margeride. Rapport BRGM R 30695 DL/C DAM 90.

DEROIN J.-P. (1990). - Méthodologie d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale en zone tempérée. Apports à la connaissance géomorphologique, géologique et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc (sud de la France). Thèse, Univ. Paris VI, Documents du BRGM Fr., n° 208, 293 p.

DEROIN J.-P., BECQ-GIRAUDON J.-F., PROST A.-E. (1990). - Fracturation tardi-hercynienne et détritisme associé : chronologie des événements dans les massifs granitiques cévenols décrochés par la Faille de Villefort (Mont Lozère et Borne, sud-est du Massif Central français). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **311**, (2), pp. 865-871.

DEROIN J.-P., COUDERT J.-M., SCANVIC J.-Y. (1991 a). - Use of satellite imagery for geological mapping of the basement and peripheral sedimentary cover. Examples in the SE of French Massif Central. Proc. 8th Thematic Conf. on Geologic Remote Sensing, Denver (USA), **2**, pp. 1215-1228.

DEROIN J.-P., PROST A., SIMONIN A., DEROIN T., SCANVIC J.-Y. (1991 b). - Evidences of glaciogenic features perceived by Spot HRV. Example in the French Massif central. IGARSS 91, Helsinki. ESA-SP, **4**, pp. 2469-2472.

Les résultats cartographiques font l'objet d'une carte de synthèse à l'échelle de 1/250 000, concernant essentiellement la relation discontinuité-image/fracturation, d'une part, discontinuité-image/volcanisme, d'autre part, et de deux maquettes téléanalytiques qui contribuent à la réalisation des cartes géologiques à 1/50 000. Plus précisément quatre interprétations paraissent avoir une plus grande importance car elles corroborent des observations cartographiques de terrain ou confirment certaines hypothèses. Il s'agit :

— des observations de nature spectrale concernant les faciès Burzet, Aubrac et Lozère, dont l'origine glaciaire au sens large peut être avancée à la suite des observations faites sur le terrain ;

— des observations de nature structurale concernant l'extension du faisceau de failles de Villefort-Langogne et l'axe thermique du massif des Coirons ;

— des observations de type morphologique concernant la structure circulaire du massif des Coirons qui pourrait correspondre à une caldeira ;

— de la liaison du volcanisme avec les discontinuités-image d'orientation N-S, N 60°, N 120° et N 160°.

DUTARTRE Ph. (1982). - Étude de la fracturation du granite de la Margeride. Documents du BRGM Fr., n° 41, 344 p.

FABRE G. (1877). - Sur l'âge et la constitution des régions schisteuses du Gévaudan et des Cévennes. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (3), **5**, pp. 399-409.

MEKARNIA A., CHOROWICZ J. (1992). - Geological analysis of Spot imagery at the 1:25,000 scale: Example of the Eastern part of the Gabian petroleum structure in Southeastern France. *Remote Sensing of Environment*, **39**, pp.179-185.

PROST A., BECQ-GIRAUDON J.-F. (1989). - Evidence for mid Permian compressive tectonics in Western Europ supported by a comparison with the Alleghanian geodynamic evolution. *Tectonophysics*, **169**, pp. 333-340.

PROST A., DEROIN J.-P., SIMONIN A., DEROIN T. (1991). - Le faciès pétrographique du sommet de Finiels : résultat de la dynamique glaciaire sur le batholite granitique du mont Lozère (Cévennes, sud de la France). *Géologie de la France*, n° 2, pp. 3-7.

SCANVIC J.-Y., WEEKSTEEN G. (1981). - Notice explicative de la carte des linéaments de la France. Documents du BRGM Fr., n° 14, 14 p.

SCANVIC J.-Y. (1982 a). - Perspectives d'application géologique de la télédétection thermique spatiale. *Géochronique*, n° 3.

SCANVIC J.-Y. (1982 b). - Signification géologique de quelques données thermiques et spatiales de la France : une contribution du satellite HCMM. *Revue Photo-Interprétation*, 1.

SCANVIC J.-Y. (1984). - Étude par télédétection du district de Pontgibaud, Massif central, France. Rapport BRGM 84 SGN 330 GEO.

VARET J., STIELTJES L., GÉRARD A., FOULLAC C. (1980). - Prospection géothermique intégrée dans le massif du Mont-Dore (France). Synthèse. Rapport BRGM-CEE-DGRST 80 SGN 150 GTH.

Cartes géologiques.

Carte géologique de Valence, 1/250 000.

Carte géologique Privas, 1/80 000.

Cartes géologiques 1/50 000 : Roanne, Aigueperse, Le Mayet-de-Montagne, Burzet, Aubenas, Monistrol, Cayres, Aigueperse.

MÉTHODOLOGIE D'UTILISATION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE A HAUTE RÉOLUTION SPATIALE EN ZONE TEMPÉRÉE

Apports à la connaissance géomorphologique, géologique
et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc
(Sud de la France)

par

Jean-Paul DEROIN

Document du BRGM n°208

Les conditions d'affleurement en zone climatique tempérée, comme dans les Cévennes et le Bas-Languedoc, nécessitent la compréhension préalable des relations entre les signatures spectrales et la nature du couvert végétal, la morphologie, les types de réseaux hydrographiques, etc. Nous montrons en utilisant l'imagerie à haute résolution spatiale SPOT, qu'une démarche interdisciplinaire associant la botanique, la géomorphologie, la géochimie, la géophysique, la stratigraphie, la tectonique et la métallogénie, renouvelle l'approche analytique et interprétative des paysages à des fins géologiques. Des campagnes de radiométrie de terrain à l'aide du radiomètre CIMEL, simulant au sol les longueurs d'onde du capteur HRV de SPOT, permettent d'étalonner les mesures sur les roches, les sols et la végétation. L'illustration principale de l'approche interdisciplinaire est la découverte d'une relation entre la réponse spectrale anormale de groupements monospécifiques de hêtres - mise en évidence lors d'une segmentation de l'image en unités de paysage -, un déficit en certains éléments reconnu par prospection géochimique stratégique et la présence de dépôts d'âge stéphano-autunien jusqu'alors non identifiés sur le Mont Lozère. Pour ces derniers, l'étude structurale et stratigraphique détaillée permet l'insertion dans la chronologie des événements tectoniques tardi-hercyniens. En outre, les études structurales menées à partir de l'analyse des images (cartographie télé-analytique) et sur le terrain permettent de préciser la cinématique des failles cévenoles (faille de Villefort, faille des Cévennes, etc.) et de reconnaître des systèmes tectono-magmatiques liés aux minéralisations intra- et périplutoniques du socle cévenol ou au magmatisme alcalin oligocène du Montpelliérais.

Outcrop conditions in regions of thick vegetation cover such as exists in the Cévennes and in Bas Languedoc necessitate preliminary investigation of the relationships between spectral signatures and the nature of the vegetal cover, morphology, types of drainage network, etc. It is shown, using an interdisciplinary approach incorporating botany, geomorphology, geochemistry, geophysics, stratigraphy, structure, and metallogeny, that SPOT-HRV digital imagery provides a new approach to the analysis and interpretation of landscapes for geological purposes. Measurements on rocks and on vegetation have been calibrated on the results of a number of field radiometric surveys, simulating on the ground the wavelengths of the SPOT-HRV sensor using the CIMEL radiometer. The best illustration of the utility of the interdisciplinary approach was discovered during identification of landscape units. The discovery was that a relationship exists between the anomalous response of monospecific beech tree groups, a manganese deficit recognised in geochemical exploration, and the presence of hitherto unidentified Stephanian-Autunian sedimentary rocks on Mont Lozère. Detailed structural and stratigraphic investigation showed that these rocks have been affected by late Hercynian tectonic activity. The anatomical modifications to the leaf of the beech tree, which are the histological cause of the spectral response in question, have also been explained. In addition, combined field structural mapping and structural image analysis, notably tele-analytical mapping, identified the kinematics of the faults in the Cévennes area (Villefort, Cévennes, etc. faults) and tectono-magmatic systems related to known magmatic and late-magmatic mineralization in the Cévennes basement and to the Oligocene alkaline magmatism of the Montpellier area.

Prix de vente: 350 F + 35 F de frais de port et d'emballage

En vente chez votre libraire habituel

ou à défaut aux:

Éditions BRGM - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 38 64 30 28

accompagné de votre titre de paiement