



**étude par télédétection
de deux secteurs
d'exploration minière des Cévennes :
Mialet (Pallières) et Les Malines**

**contribution à la recherche
de guides structuraux
pour la prospection des gisements
Pb-Zn(Fe) cachés**

**rapport d'étude préliminaire aux travaux
de la fiche programme RM 63**

J.-P. Deroin

**décembre 1991
R 31 940**

RESUME.

Dans le cadre de la synthèse "Inventaire" sur la Bordure cévenole, le BRGM s'intéresse à la recherche des minéralisations Pb-Zn en extension du gisement des Malines (Sud des Cévennes). Sur une zone étendue à l'ensemble de la bordure cévenole, entre Alès et Saint-Hyppolite (bassin de Mialet), et sur le détroit des Causses entre la Séranne et la vallée de l'Arre (Larzac), une analyse de données satellitaires multispectrales et panchromatiques SPOT est effectuée, puis complétée par celle d'images radar. Ces analyses s'insèrent au sein d'une recherche interdisciplinaire (RM 19) dont les principaux axes méthodologiques ont été : la gravimétrie du dôme des Malines, du causse de Blandas et du bassin de Mialet, la géochimie isotopique des différents corps minéralisés, la prospection des hydrocarbures gazeux (Blandas), l'étude sédimentologique des faciès bathoniens (seuil caussenard). Les données satellitaires sont analysées en vue de compléter la vision structurale régionale. Elles procurent effectivement des indications sur le style tectonique affectant la couverture, en rapport avec la structuration du substratum, principalement aux alentours du Caylar où de nombreux sondages permettent de connaître la nature du socle (granitique/schisteux). Un schéma tectonique du socle du détroit des Causses est proposé ; il délimite deux domaines de structuration différente situés de part et d'autre de la faille subméridienne d'Avèze-Montdardier. Sur le Larzac, entre la faille de Saint-Michel et le faisceau cévenol, les données radar montrent un réseau de discontinuités NE-SW, sans traduction fragile apparente, correspondant vraisemblablement à la structuration du socle sous-jacent ; ce point devra être confirmé par géophysique. Dans le bassin de Mialet, suivant la vallée du Gardon de Saint-Jean, apparaît une structure linéaire ESE-WNW, non repérée au sol jusqu'à présent, et se traduisant sur les données gravimétriques par une discontinuité majeure.

TABLE DES MATIERES.

Résumé.	2
Table des matières.	3
Figures et planches.	4
Ière PARTIE. Présentation générale.	5
1. Contexte	6
2. Objectifs	7
3. Rappel des études antérieures par télédétection	8
3.1. Rappel bibliographique	8
3.2. Rappel des conclusions de BONIJOLY et DELPONT (1982)	11
4. Données utilisées	12
4.1. Données satellitaires utilisées	12
4.2. Autres données	13
5. Documents analytiques produits	13
6. Potentiel métallogénique régional	14
IIème PARTIE. Le bassin de Mialet.	15
1. Cadre géographique et géologique	16
2. Cadre géologique	16
3. Contexte structural des indices et des gîtes	17
4. Interprétation	18
IIIème PARTIE. Les Malines.	19
1. Cadre géographique et géologique	20
2. Cartographie à partir de SPOT-P	20
3. Apport à la connaissance géologique régionale	22
4. Les données du radar allemand E-SAR	23
CONCLUSION GENERALE	26
BIBLIOGRAPHIE	27

FIGURES ET PLANCHES.

Fig.1	Localisation des secteurs d'exploration
Fig.2	Découpe des cartes régulières
Fig.3	Interprétation MSS (Scanvic et Weecksteen)
Fig.4	Interprétation MSS
Fig.5	Interprétation SPOT
Fig.6	Carte de la bordure cévenole
Fig.7	Coupe-type de la bordure cévenole
Fig.8	Indices minéralisés de la bordure cévenole
Fig.9	Cartes du Pb et du Zn de la bordure cév.
Fig.10	Schéma structural du détroit des Causses
Fig.11	Interprétation du radar E-SAR
Pl. coul. 1	Image SPOT sur le bassin de Mialet
Pl. coul. 2	Image SPOT sur les Malines
Carte 1	Interprétation à 1/50 000 sur Mialet
Carte 2	Interprétation à 1/50 000 sur les Malines

IERE PARTIE

*** * ***

PRESENTATION GENERALE

1. CONTEXTE.

Le programme RM 19 développe une approche interdisciplinaire pour la prospection de gisements cachés dans le Cambrien de la Méditerranée occidentale. On recherche des corrélations entre le district minier des Malines et les prospectus comparables du Massif de l'Iglesiente (Sardaigne).

S'insérant dans le cadre du projet de recherche "Partie 3 : Cévennes" financée par la Direction Scientifique du BRGM pour la Division des Activités Minières (Coordination : J.-J. ORGEVAL), et des travaux de synthèse de la Bordure cévenole dans le cadre de l'Inventaire, une étude par télédétection est effectuée sur deux secteurs de minéralisations Pb-Zn-(Fe) localisées dans le Cambrien et la couverture mésozoïque, entre Alès et le détroit des Causses (bordure cévenole).

Il s'agit de préparer l'implantation de nouveaux sondages et de hiérarchiser les zones suivant leur potentiel métallogénique, d'abord dans le secteur du horst de Pallières, puis dans le secteur occidental du horst de Saint Bresson (extension de la mine des Malines). Des travaux gravimétriques et géochimiques sont menés en parallèle sur ces gisements cachés.

Cette étude sera détaillée, sur le site des Malines, au cours des travaux de la fiche-programme RM 63 "Télédétection et Mine", financée en 1991-1992, où on recherchera des traductions, tant à l'affleurement que sur l'image satellitaire, des traits majeurs du substratum et de l'évolution de la couverture, notamment la dolomitisation.

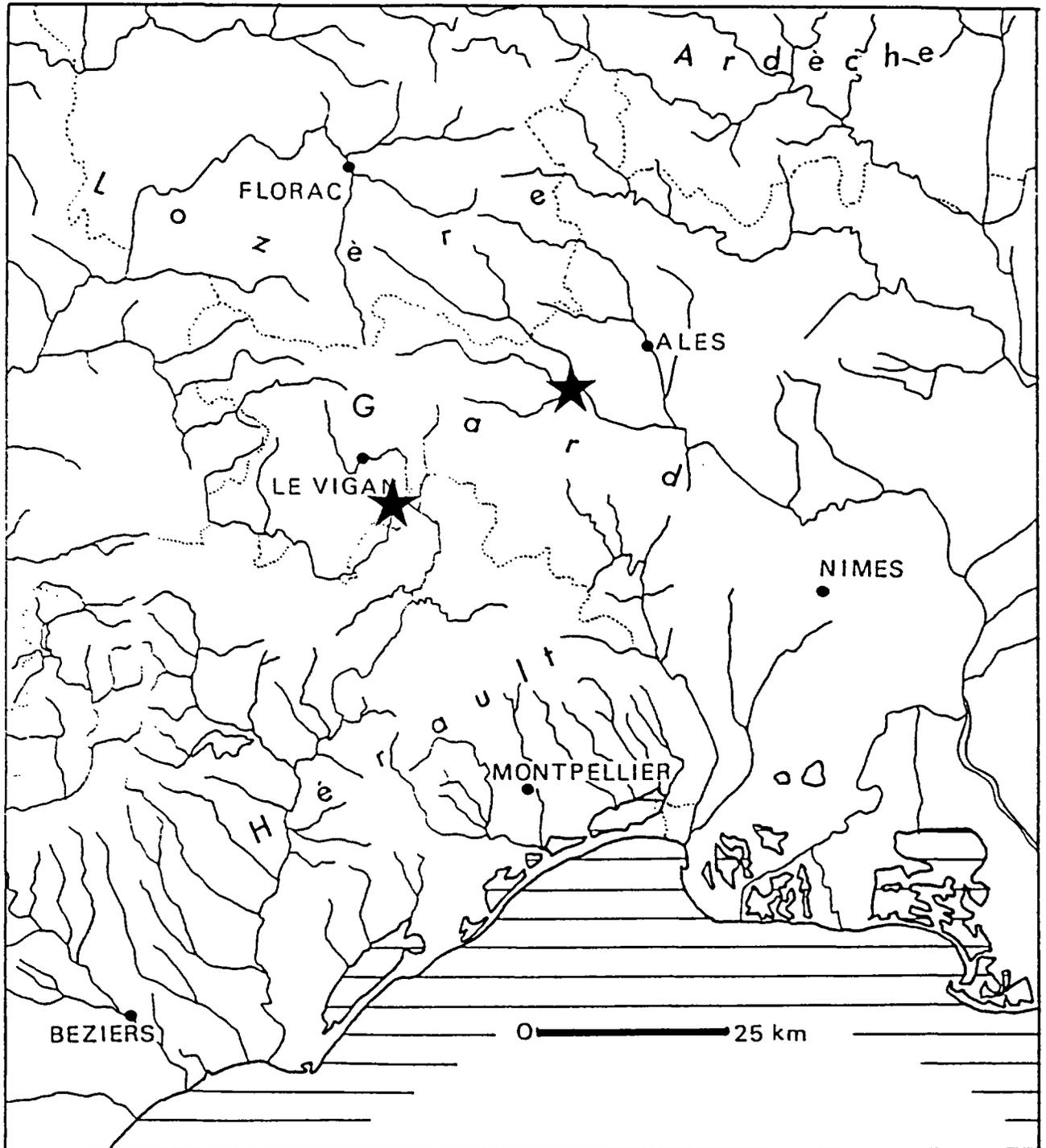


FIG.1. LOCALISATION DES SECTEURS DES MALINES (PRES DU VIGAN) ET DE MIALET (PRES D'ALES).

2. OBJECTIFS.

La bordure cévenole est étudiée entre le causse de Larzac, au SW, et la ville d'Alès, au NE (Fig.1 et 2). L'accent est porté sur deux secteurs : (1) le bassin de Mialet (# 400 km²), (2) le seuil caussenard entre les Malines et la vallée de la Vis (# 1000 km²). Dans cette région, les minéralisations Pb-Zn se concentrent à trois niveaux stratigraphiques : le Cambrien, le Trias et le Bathonien. Elles sont le plus souvent liées à la présence de hauts-fonds, entre le môle cévenol et la Montagne Noire, d'une part (Les Malines), en bordure SE du môle cévenol, d'autre part (Mialet, Pallières).

Les niveaux potentiellement intéressants sur la bordure du bassin du Sud-Est sont les carbonates du Cambrien et du Mésozoïque dans lesquels des phénomènes de dolomitisation apparaissent suivant différents types génétiques :

- dolomie diagénétique développée dans certaines formations, notamment des carbonates triasiques (Les Malines, etc.) ;
- dolomie ruiniforme, essentiellement dans le Bathonien, mais également retrouvée dans les milieux péri-récifaux du Jurassique supérieur ;
- dolomie à structure en colonnes, séquante sur la stratigraphie.

L'objectif est d'évaluer la contribution de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale à une étude intégrée — incluant de la géophysique (gravimétrie) et de la géochimie. La finalité est l'implantation de sondages d'exploration profonds sur des cibles structurales retenues comme favorables. Les résultats d'études antérieures (travaux de télédétection à partir de LANDSAT-MSS, hydrogéochimie, etc.) seront également utilisés dans la phase de synthèse.

L'imagerie est principalement analysée afin de détecter et de hiérarchiser les réseaux de failles, orientant souvent les processus de dolomitisation. Il s'agit d'étudier la fracturation contrôlant le horst

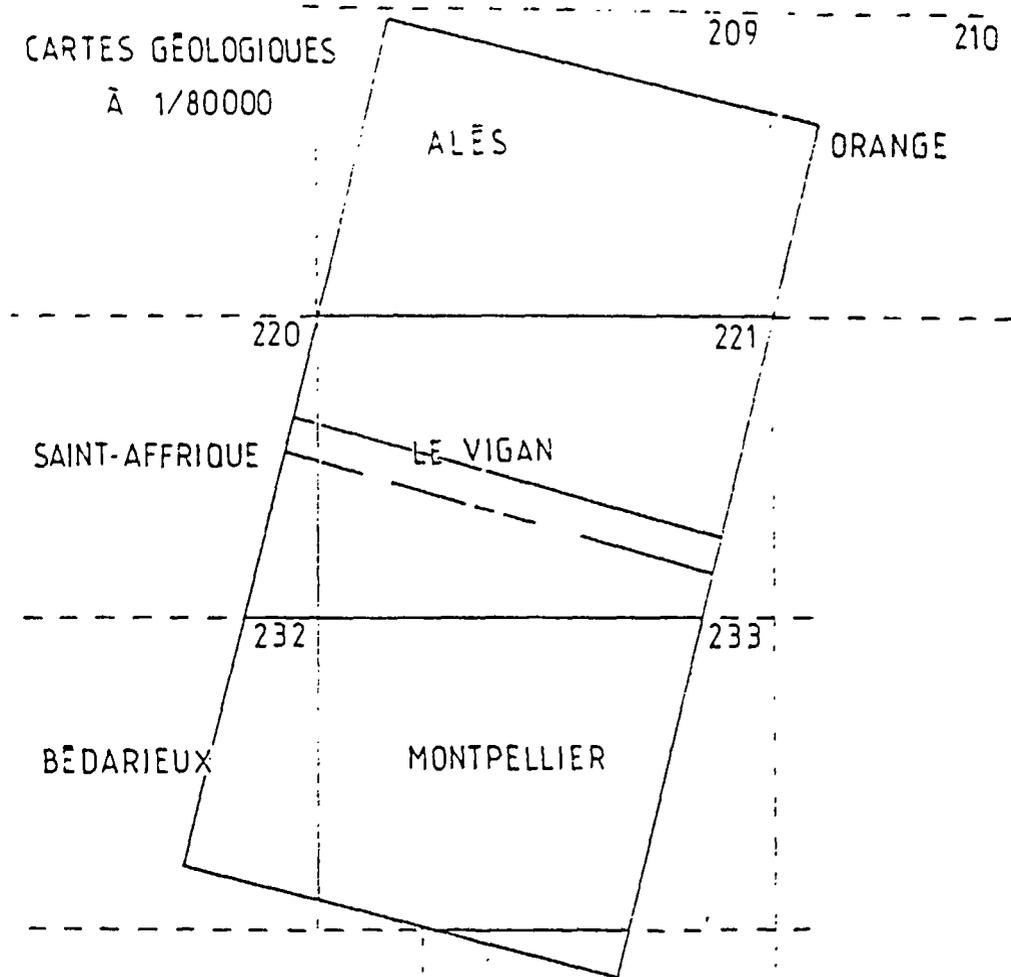
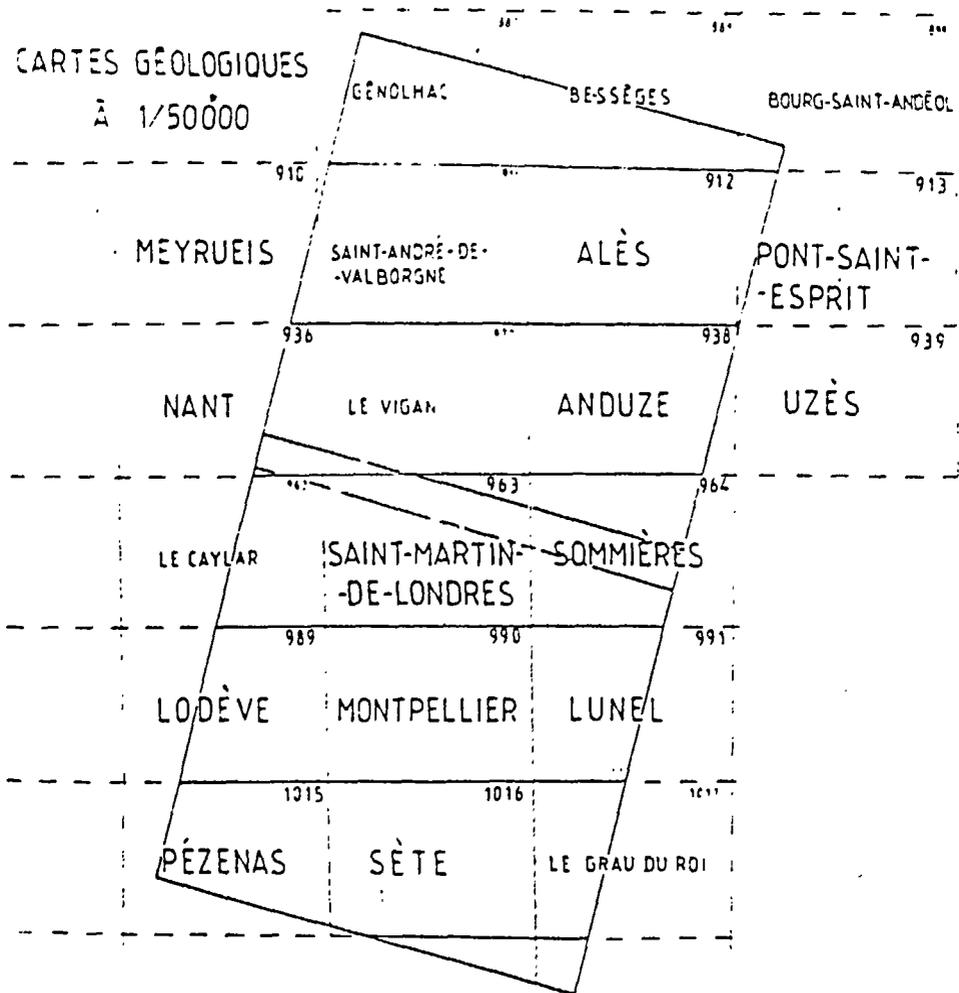


FIG. 2. DECOUPE DES CARTES REGULIERES

de Pallières et son environnement sédimentaire (bassin liasique de Mialet), ainsi que la fracturation affectant le socle du détroit des Causses, dans le secteur de Blandas, et sa liaison (éventuelle) avec les structures avérées du socle affleurant. Sur ce deuxième secteur, une cartographie des lithofaciès est également effectuée.

3. RAPPEL DES ETUDES ANTERIEURES PAR TELEDETECTION.

3.1. Rappel bibliographique régional.

Les données LANDSAT 1 (ERTS) ont été analysées à l'échelle régionale par DUPLAN (1973), GUILLEMOT *et al.* (1973) et CAZABAT (1975). L'exploitation initiale a consisté à établir des cartes de *linéaments*, rarement corrélées avec d'autres indices ; CAZABAT, cependant, a montré le lien entre les familles de *linéaments* et les sources thermales, entre autres en Montagne Noire. Pour GUILLEMOT *et al.* l'observation des images a permis la reconnaissance de directions structurales, plus ou moins connues au sol ; celles-ci définissent, dans le Languedoc, une zone de transition entre les zones alpine et pyrénéenne. Des réseaux en échelon sont supposés dans le secteur du Pli de Montpellier. Dans l'ensemble, les explications géologiques des principaux traits de l'imagerie restent toutefois embryonnaires.

Les données ERTS et Landsat 2 ont été systématiquement exploitées par SCANVIC et WEECKSTEEN (1980) pour la confection d'une carte des linéaments français. Pour ces auteurs, les linéaments possèdent généralement une signification structurale, quelquefois confirmée par les méthodes géophysiques. Dans le Couloir rhodanien on observe la continuité des structures de l'Est du Massif Central, notamment NE-SW (direction cévenole). Dans le socle du Massif Central, SCANVIC et WEECKSTEEN reconnaissent des accidents d'échelles diverses tels que les failles de Villefort et d'Orcières, mais aussi la faille du Peyrou de faible extension, le long de laquelle on peut rétablir une chronologie relative d'événements tectoniques (DEROIN *et al.*, 1990a). La direction N.120°E est, pour la première fois, bien mise en évidence ; elle

apparaît comme majeure dans les schémas géologiques établis pour le Bas-Languedoc, notamment au Cénozoïque (CHOROWICZ *et al.*, 1991).

Des images LANDSAT 2 et 3, acquises de 1977 à 1980, ont servi à l'élaboration d'une mosaïque à 1/500 000 couvrant l'ensemble du Sud de la France (CARRERE, 1987). A partir de ces données, l'auteur a défendu certaines hypothèses structurales, notamment celle de la prolongation vers le sud (région de Béziers) de la Faille des Cévennes. A. BLUSSON a utilisé des données similaires, en les interprétant à plus grande échelle (1/250 000) et spécifiquement sur le faisceau de failles "Cévennes-Séranne".

D'autres données LANDSAT-MSS ont été analysées à des fins thématiques. Le traitement classique dit "en composantes principales" a été évalué dans le secteur du bassin de Saint-Chaptes (BERGERAT *et al.*, 1985). CHOROWICZ (1984) a interprété, sur le Bas-Languedoc, une combinaison originale MSS-RBV pour illustrer la cartographie à petite échelle à partir de l'imagerie. BONIJOLY et DELPONT (1982) ont étudié spécifiquement la liaison entre la fracturation de terrain et l'imagerie MSS sur le seuil caussenard.

Les images LANDSAT-MSS sont des données particulièrement utiles au géologue désireux de connaître et de comprendre les grandes structures. Il s'agit d'une information nécessaire à toute synthèse géologique.

Les données HCMM et NOAA sont initialement prévues pour le suivi de la météorologie. Leur évaluation pour des études géologiques a toutefois été envisagée, notamment sur la Provence. Pour RABU, la combinaison HCMM/LANDSAT MSS permet une amélioration significative de la cartographie télé-analytique ; la dolomie et les calcaires marneux, par exemple, se signalent par un comportement thermique différent de celui des calcaires francs alors que les réflectances obtenues dans le visible et le proche infrarouge ne suffisent pas à différencier ces formations. L'infrarouge de nuit apparaît également plus utile pour des applications géologiques. Les cartes thermographiques obtenues par les satellites NOAA montrent les grandes unités d'occupation des sols. Leur utilité est surtout mentionnée dans le domaine maritime (courants, etc.). Sur le continent, la dualité froid/chaud correspond en grande partie à la végétation : par exemple, les Cévennes boisées apparaissent assez

froides tandis que les Grands Causses présentent des températures de surface plus chaudes.

Des observations de terrain ont également été effectuées dans le domaine thermographique (BROSSE, 1975).

L'efficacité des images SPACELAB, à 20 mètres de résolution et permettant la stéréoscopie, a été surtout envisagée dans le cadre de l'étude structurale (CARRERE, 1987). L'auteur insiste sur l'importance de la direction d'éclairage pour ce capteur embarqué à bord des navettes spatiales. De la même manière, les données de l'instrument embarqué sur SKYLAB ont été utilisées en combinaison avec d'autres, plus classiques (FONTANEL *et al.*, 1976). Une étude préliminaire de ces données a été réalisée dans le cadre du projet PYRALP (synthèse Pyrénées-Alpes).

Les images de LANDSAT TM fournissent, depuis 1984, une information spectrale très étendue (du visible au moyen infrarouge). Pourtant, sur la France en général et tout particulièrement sur le Sud, elles n'ont guère été utilisées ; ceci est dû en grande partie au lancement, dès 1986, de SPOT vers lequel les géologues se sont rapidement dirigés. La plupart des études cite TM en opposition à l'imagerie SPOT ; souvent les auteurs confrontent l'information spectrale de LANDSAT (occupation des sols, végétation) et l'information structurale de SPOT. Cette dernière se retrouve pourtant dans les canaux de l'infrarouge du capteur américain. La complémentarité est généralement soulignée mais les comparaisons méthodologiques dans ce domaine demeurent rares.

Le programme SPOT a été précédé d'une évaluation des capacités de l'instrument HRV (haute résolution visible) effectuée à l'aide de simulations du capteur aéroporté Daedalus. Les problèmes de géométrie et de calibration de l'instrument ont, pour la plupart des études prospectives, entraîné des conclusions négatives, comme sur les zones de Montpellier et de Camarès (LETOUZEY et XAVIER, 1981). Pour le géologue, la possibilité d'observer les données satellitaires en stéréoscopie est une innovation qu'il faut apprendre à gérer, notamment en combinant l'information spécifique du relief fournie par les MNT. Dans le domaine de la cartographie télé-analytique, l'imagerie SPOT permet un travail détaillé,

principalement sur les secteurs à lithologie subaffleurante (Bas-Languedoc, Provence calcaire). Sur des zones bien connues au sol, comme la région de Montpellier ou le bassin d'Alès, les méthodes de télé-analyse synthétique ont été mises en oeuvre (DEROIN, 1987 & 1990 ; DEROIN et CHOROWICZ, 1989).

L'analyse détaillée des données SPOT et l'intégration d'informations exogènes permet d'obtenir des résultats méthodologiques et géologiques particulièrement importants. Par exemple, une anomalie de forte réflectance (DEROIN et al., 1990b) a été mise en relation avec le substrat pétrographique, la géochimie stratégique de surface, et surtout le couvert végétal pour lequel une approche phytomorphologique et anatomique a permis de situer précisément le siège de l'anomalie [Th.DEROIN in DEROIN (1989)]. Des arkoses sont à l'origine de cette dernière ; elles ont été intégrées dans un schéma tectonique tardi-hercynien (DEROIN et al., 1990a).

Les études structurales sont totalement réactualisées grâce aux renseignements spécifiques fournis par les satellites ; nous avons montré de telles implications en intégrant les magmatites oligocènes de Montpellier à la trame de fractures relevée à partir de l'imagerie (DEROIN et TAMAIN, 1990). La possibilité de stéréoscopie vraie permet l'obtention de relevés homogènes et représentatifs de la fracturation. L'imagerie satellitaire SPOT est un produit particulièrement adapté pour la cartographie géologique à moyenne échelle (1/50 000 et 1/100 000).

3.2. Rappel des conclusions de BONIJOLY et DELPONT (1982).

Une étude exhaustive du seuil caussenard a été effectuée par BONIJOLY et DELPONT (1982), qui ont exploité des données LANDSAT-MSS à petite échelle — en liaison avec une étude de terrain — pour la connaissance géologique du bassin des Causses et de la bordure cévenole. Nous pensons qu'il est utile de rappeler les grandes lignes de leurs conclusions générales.

"La télédétection (...) permet de décrire l'organisation du bassin des Causses et de la bordure cévenole suivant deux échelles. D'une part, elle établit le réseau des grands linéaments (...) ; peuvent notamment être citées, la faille des Cévennes (NE-SW), la faille du Vigan (E-W), les failles de Montagnol et de Saint-Michel-de-Vissec (WSW-ENE). D'autre

part, elle décrit la fracturation locale et certaines de ses anomalies (...) dans le domaine tabulaire des Causses, à l'intérieur des unités limitées par les accidents précédents. Des anomalies relatives aux déformations souples sont également signalées (...). Il est enfin possible de constater le parallélisme entre certaines directions de fracture (NNW-SSE et WNW-ESE) et des limites stratigraphiques (...). Ce même type d'étude effectué sur la bordure cévenole s'est montré plus décevant (...) le fonctionnement de la faille des Cévennes (...) oblitérant en grande partie l'influence des déformations antérieures (...). La nature des rejeux successifs observés sur les grandes failles et leur incidence sur la présence d'anomalies de fuite éventuelles souligne l'intérêt de cette étude pour la recherche minière".

4. DONNEES UTILISEES.

4.1. Données satellitaires utilisées.

La donnée de base est une série de 3 scènes SPOT mosaïquées numériquement (KJ.047.260, 047.261 et 047.262) en couple P/XS (28/29 septembre 1986), composé respectivement d'une orthophotographie acquise en mode multispectral (XS) à 400 m² de résolution (pixel à 20 m), et d'une vue oblique (22°E) acquise en mode panchromatique (P) à 100 m² de résolution (pixel à 10 m). Les images couvrent la faille des Cévennes depuis le Golfe du Lion jusqu'aux Coirons. Le piqué de l'image est amélioré par l'application d'un filtre passe-haut.

Les sites d'intérêt métallogénique sont sélectionnés au sein de cette mosaïque. Les portions de scènes sont corrigées géométriquement, puis l'étalement de la dynamique est alors adapté à chacune des cibles en fonction de leurs statistiques radiométriques propres (cf. planches couleur I et II).

Une donnée LANDSAT-MSS (212.29 du 19 septembre 1976) a également été utilisée.

4.2. Autres données.

En cours d'étude, une donnée du radar allemand E-SAR, acquise dans le cadre des travaux du Groupe *Ad Hoc* sur le Radar Spatial (GARS Larzac), a été intégrée en raison des éléments structuraux nouveaux que son analyse apporte (DEROIN et RUDANT, 1991).

5. DOCUMENTS ANALYTIQUES PRODUITS.

Les documents cartographiques suivants ont été établis :

- carte des linéaments à 1/1 000 000 levés sur MSS (d'après la carte de SCANVIC et WEECKSTEEN, 1980) reportée à l'échelle du 1/250 000 (Fig.3) ;
- carte des linéaments à 1/250 000 levés sur MSS (1976) (Fig.4) ;
- carte géologique télé-analytique à 1/100 000, issue de la compilation de différentes cartes que nous avons établies sur le secteur entre 1987 et 1990, et commentée dans DEROIN (1990) (Fig.5) ;
- carte télé-analytique à 1/50 000 sur le secteur de Mialet à partir de SPOT (carte 1) ;
- carte télé-analytique à 1/50 000 sur le secteur des Malines à partir de SPOT (carte 2).

6. POTENTIEL METALLOGENIQUE REGIONAL.

Les gîtes sont localisés à certains niveaux de la série stratigraphique (AUBAGUE et al., 1977 & 1988) :

FIG. 3. INTERPRETATION DES IMAGES MSS A 1/1 000 000 (SCANVIC ET WEECKSTEEN).

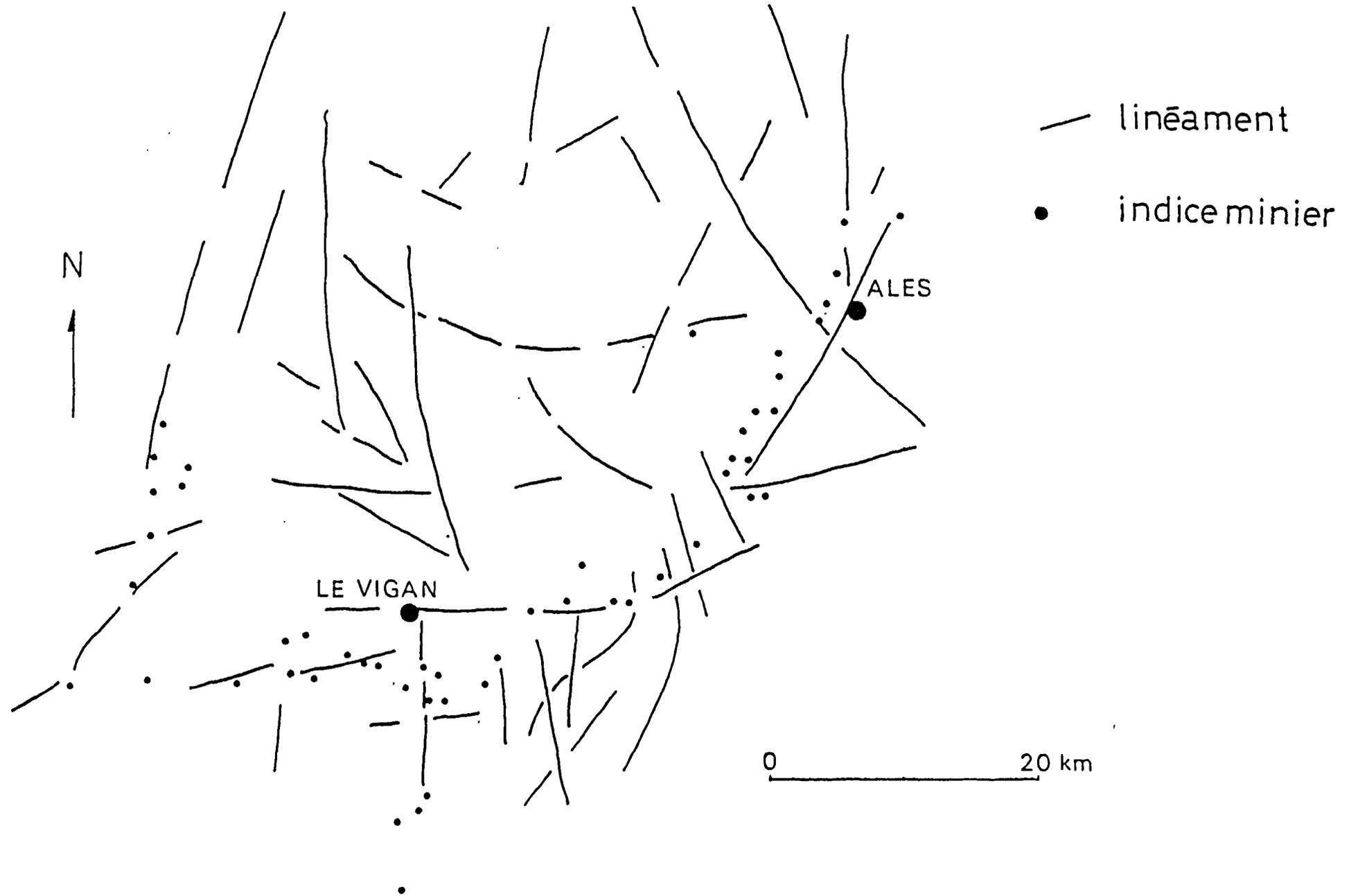
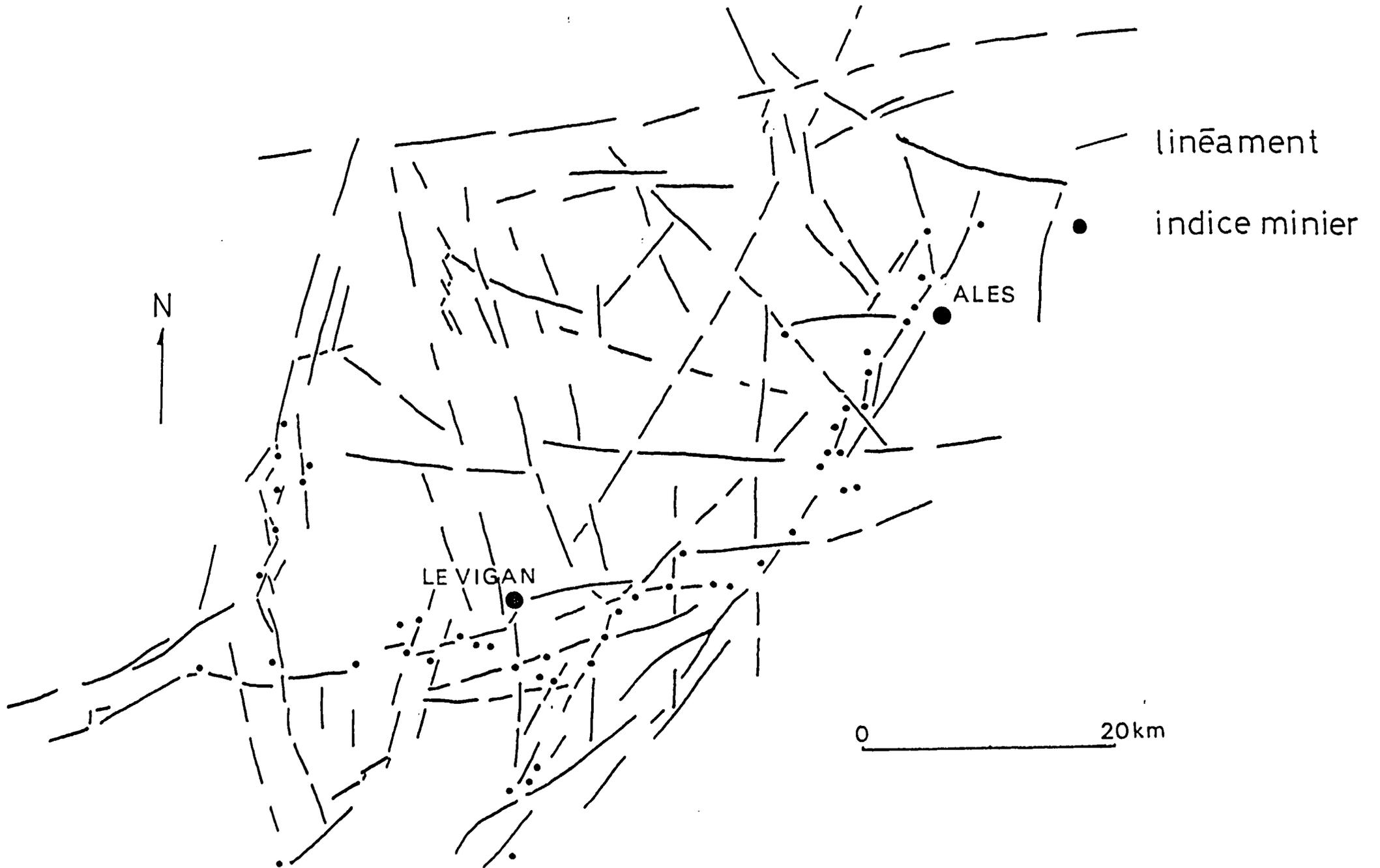


FIG. 4. INTERPRETATION DES DONNEES MSS A 1/250 000.



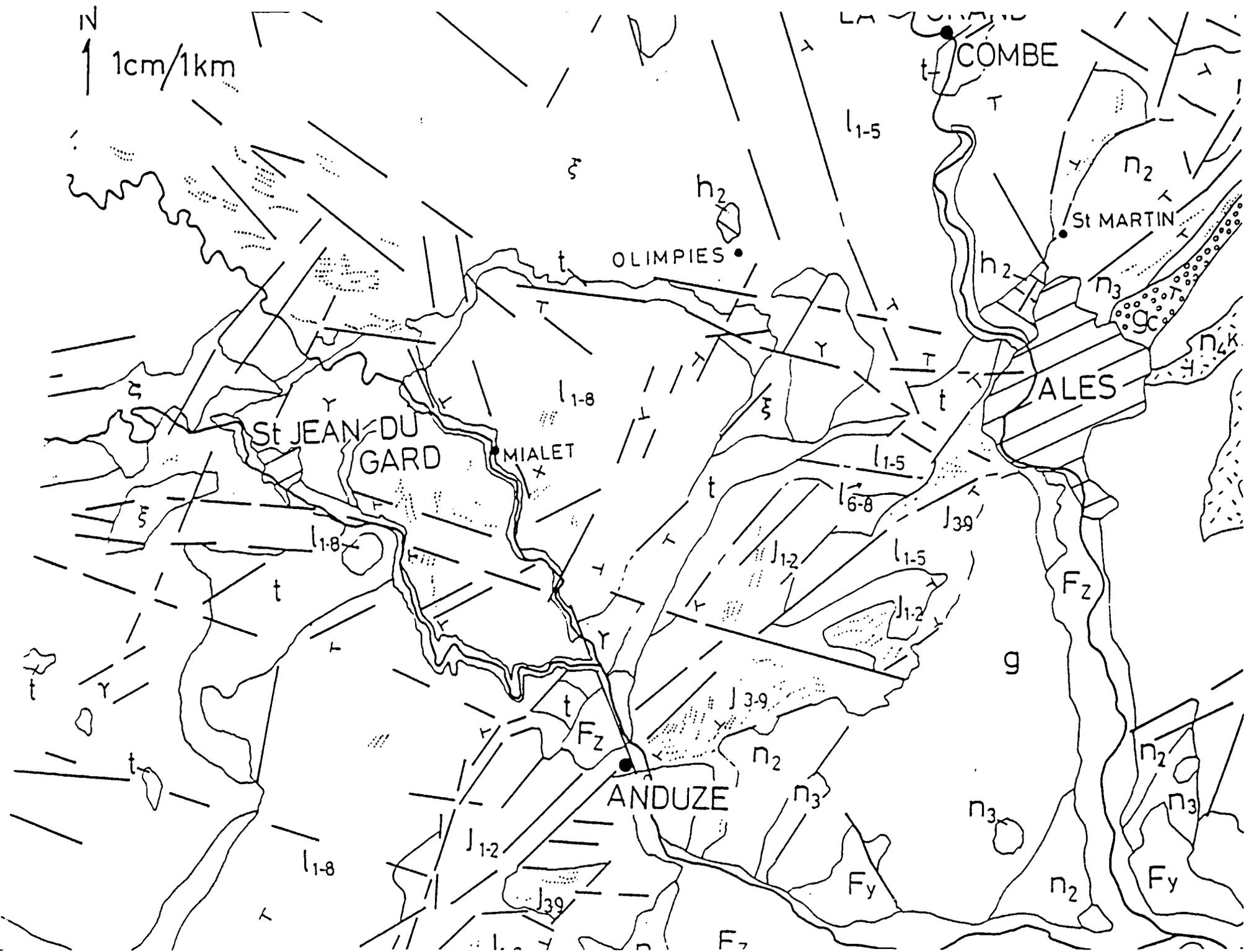


FIG. 5. INTERPRETATION DES DONNEES SPOT A 1/100 000. (même légende que carte 1)

— des remplissages barytiques riches en Pb-Zn sont connus dans le Cambrien du haut-fond des Malines, en continuité physique avec les minéralisations des assises basales du Trias. Ils représentent un stock-métal important. Dans le horst de Saint-Bresson, divers amas sont situés au contact anormal dolomie/schiste à peu de distance verticale sous la paléosurface antétriasique.

— la base locale du Trias, une formation détritique le plus souvent gréseuse (parfois carbonatée sur socle dolomitique), est de beaucoup le plus gros des niveaux-porteurs, et dans laquelle se situent deux grands gîtes de la province sous-cévenole : Largentière (Pb, Ag, Zn) et Les Malines (Zn, Pb, Ba).

— la formation argilo-dolomitique du Trias moyen renferme quelques gisements importants : couches d'Alby-Fontbonne aux Malines et à Saint-Jean-du-Pin (Mialet).

— la dolomie à intercalation de shales noirs de l'Hettangien basal, est un gros porteur régional : la Croix de Pallières (Zn, Pb).

— le reste de l'Hettangien, essentiellement dolomitique, est minéralisé de façon sporadique : Croix de Pallières, Saint-Félix d'Alès.

— la série rythmée calcaréo-dolomitique du Sinémurien-Lotharingien est minéralisée de façon économique à Durfort (Zn, Pb).

— le Bajocien est parfois minéralisé en Pb, Zn : Nord d'Alès.

— le Bathonien est constitué de dolomie périrécifale ; c'est un très gros porteur aux Malines (Zn).

— le Jurassique supérieur est minéralisé à Bois Madame, au nord de Ganges.

La répartition d'ensemble des gîtes apparaît ainsi très hétérogène à l'échelle de la région. Le bord cévenol entre Les Malines et Saint-Ambroix est très riche en occurrences minéralisées et a fourni la quasi-totalité du minerai extrait. Le bassin des Causses est beaucoup plus pauvre, au moins sur les niveaux prospectés jusqu'à présent, et n'offre que quelques concentrations Pb-Zn sur sa bordure orientale : Trèves, Saint-Jean-du-Bruel. Quelques placages sur le socle (Les Bondons, Le Bleyard) abritent des indices importants.

* * *

IIIEME PARTIE

*** * ***

LE BASSIN DE MIALET

1. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.

Le bassin de Mialet est un secteur de basses collines boisées, situé au NW de la faille des Cévennes (région d'Anduze, Saint-Sébastien, Mialet). Il correspond essentiellement à une aire de carbonates liasiques recouverts par le Chêne vert (reboisements très nombreux). Les termes liasiques reposent sur les marnes, dolomies ou grès triasiques. Ils comprennent un Hettangien le plus souvent dolomitique, un Sinémurien calcaire (faciès gris-clair à chailles) et un Carixien également calcaire, dans les secteurs les plus élevés (notamment près de la Rouvière).

Le bassin est limité par le socle métamorphique (schistes des Cévennes) et granitique (granite de Saint-Jean) sur ces bordures nord et ouest. Les couches y sont subtabulaires.

2. CONTEXTE GITOLOGIQUE.

Le plomb : le gisement principal était situé à Carnoulès (connu depuis le XIV^e siècle) ; la minéralisation est en imprégnation diffuse dans l'arkose de base du Trias. D'autres travaux sont connus dans des conditions gîtologiques semblables (Notre-Dame-de-Laval, etc.).

Le zinc : un amas minéralisé important se trouve à Saint-Jean-du-Pin où l'on trouve de la blende et de la calamine associées à la pyrite. Les imprégnations stratiformes diffuses sont souvent proches de failles et "encaissent" les carbonates du Muschelkalk. A Saint-Félix, un amas pyriteux affecte la dolomie hettangienne.

FIG. 6.

CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE
DE LA BORDURE CEVENOLE

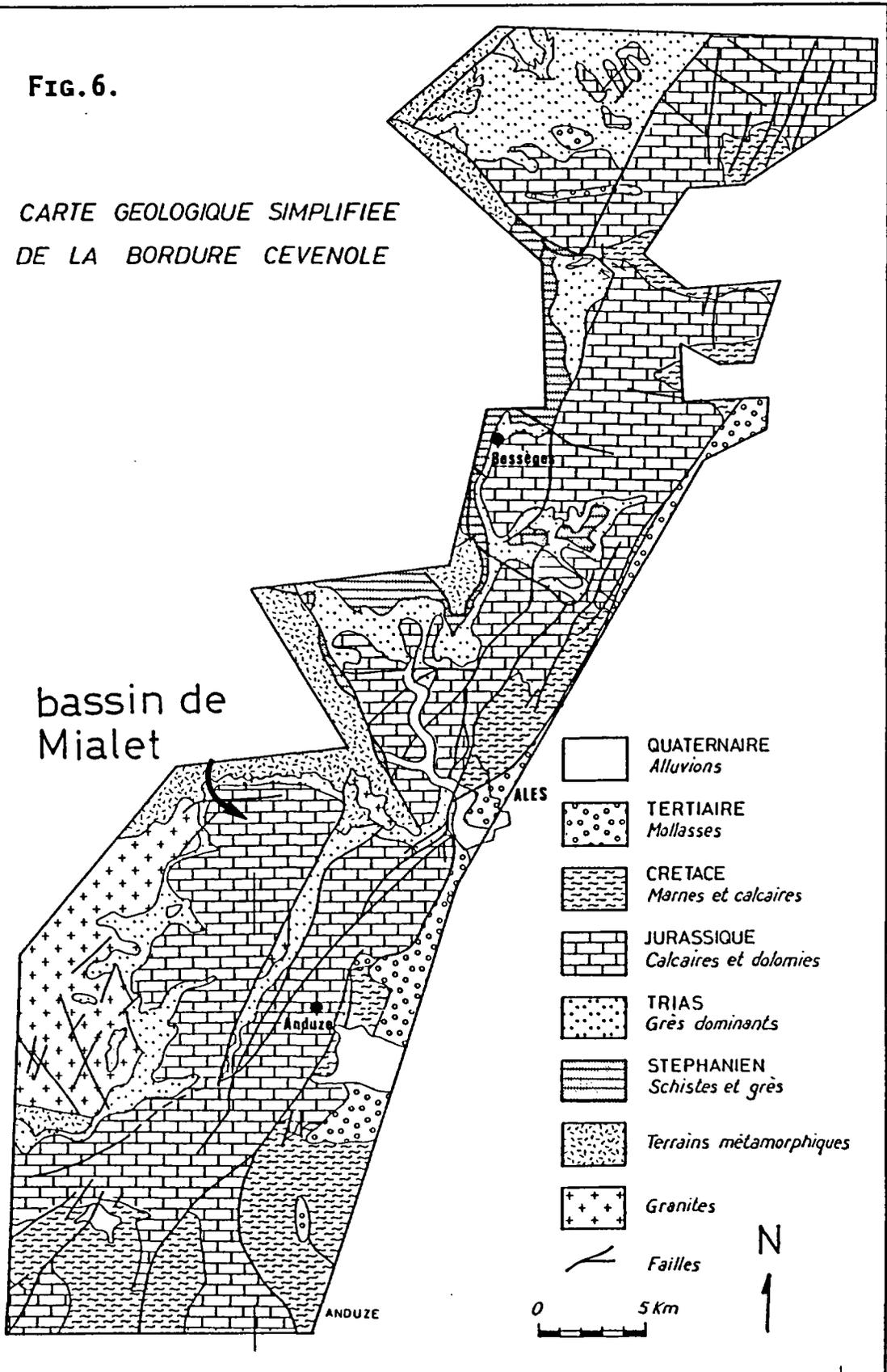


FIG. 7.

Série lithostratigraphique schématique

(Réalisée à partir de la carte géologique au 1/50 000 ALES)

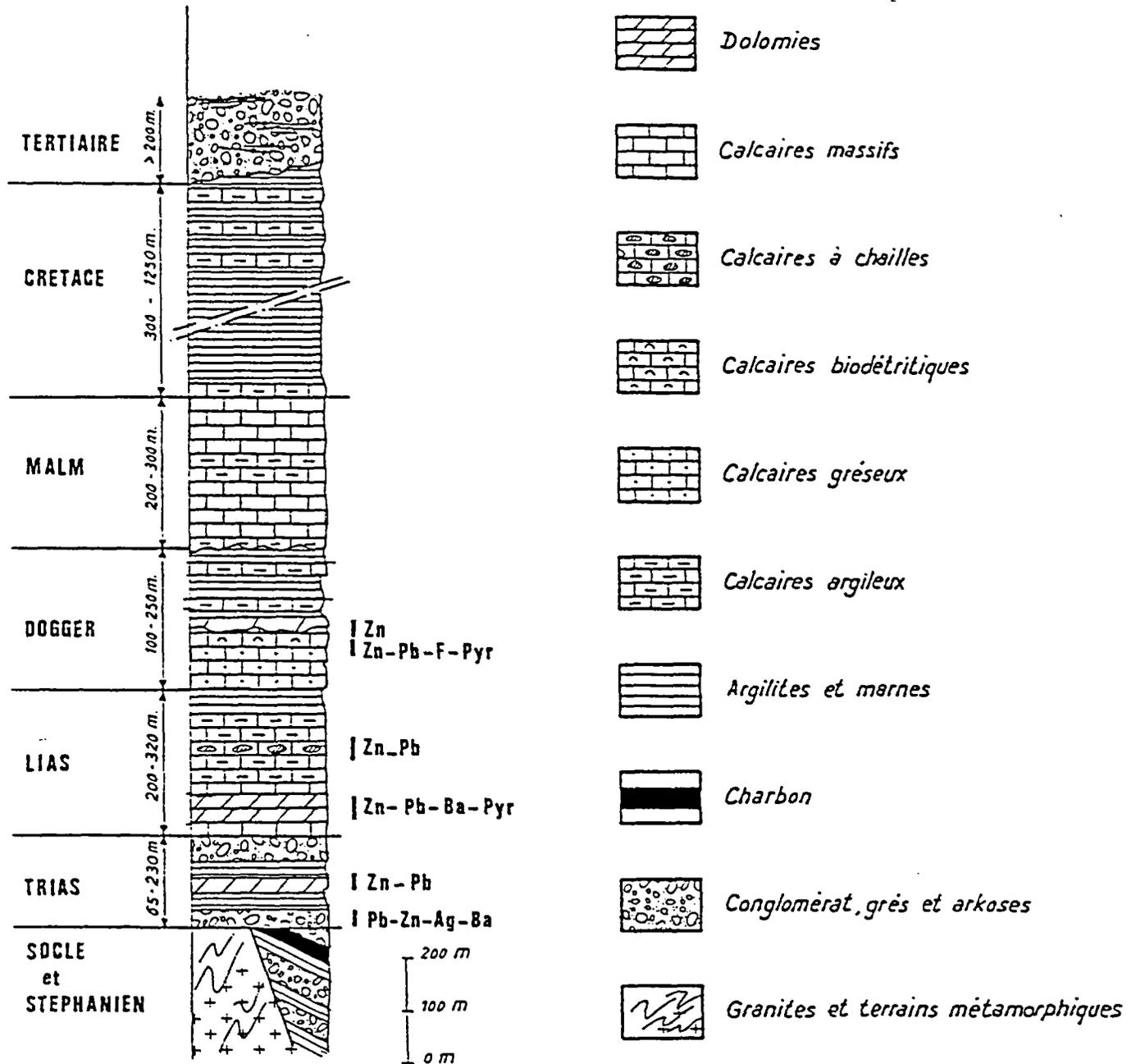
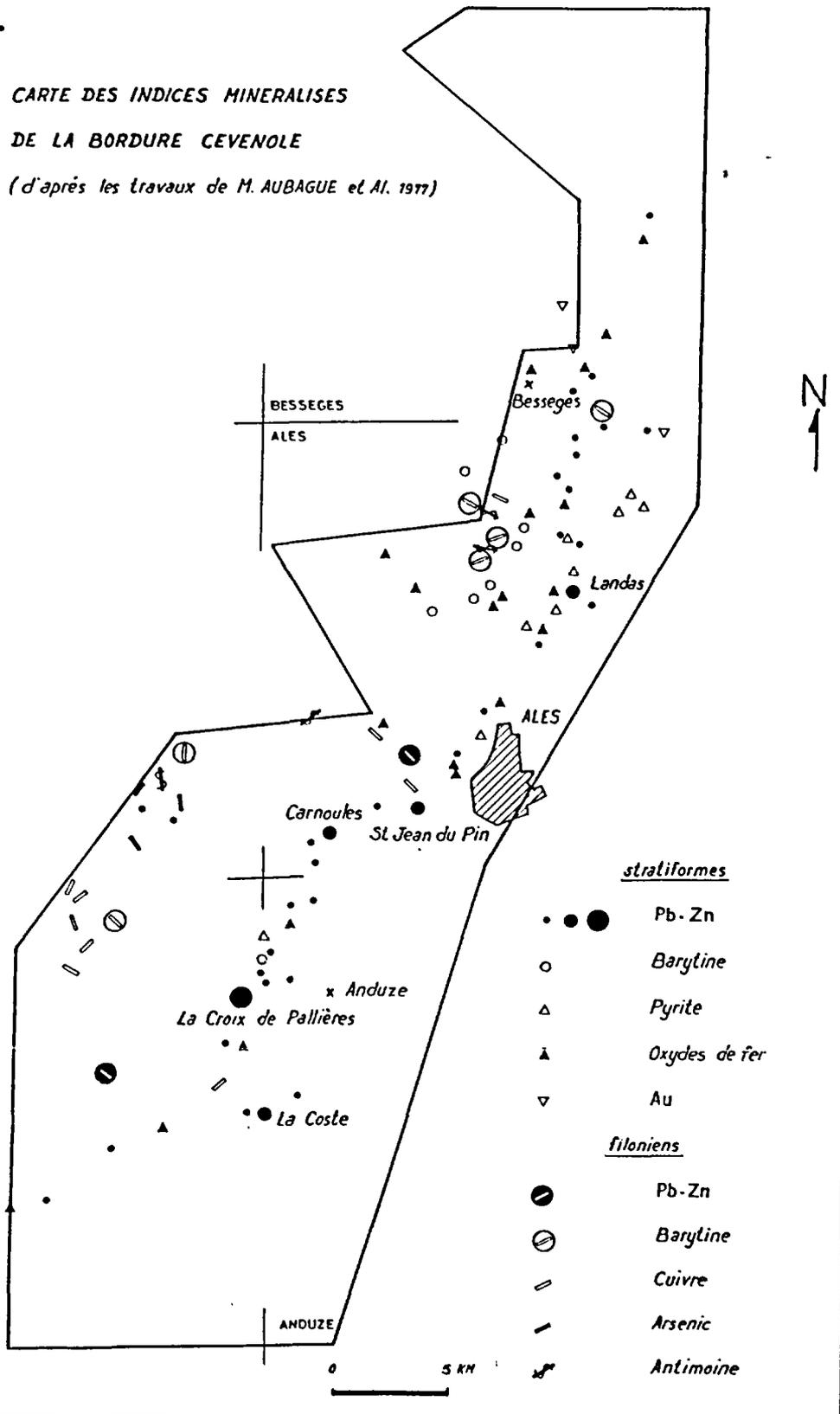


FIG.8.

*CARTE DES INDICES MINERALISES
DE LA BORDURE CEVENOLE*

(d'après les travaux de M. AUBAGUE et Al. 1977)



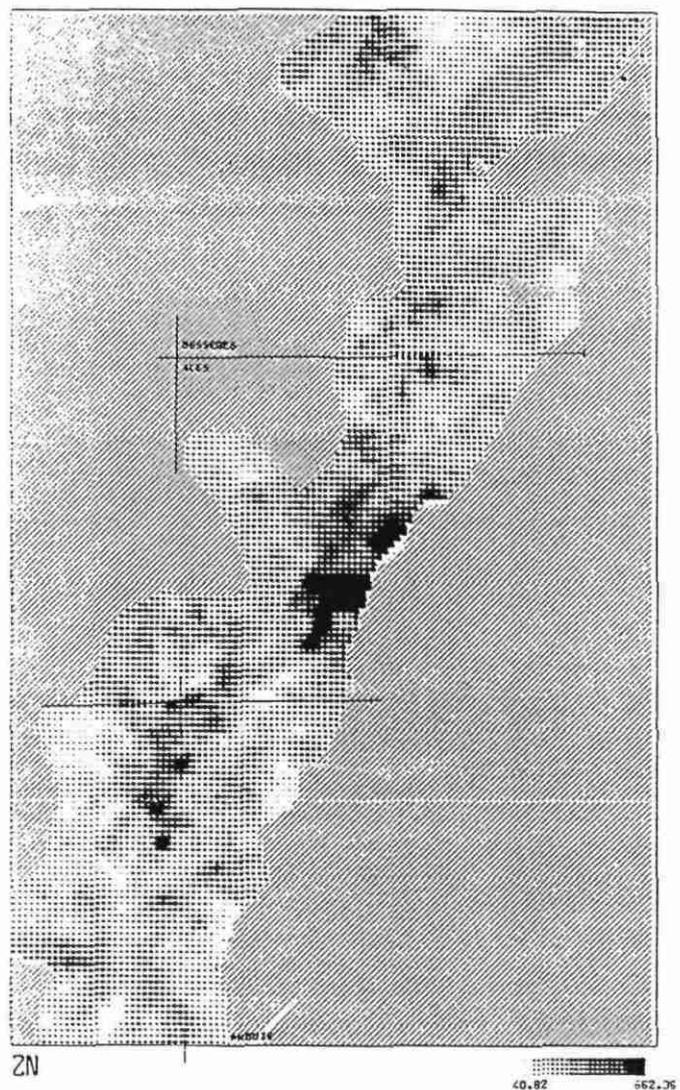
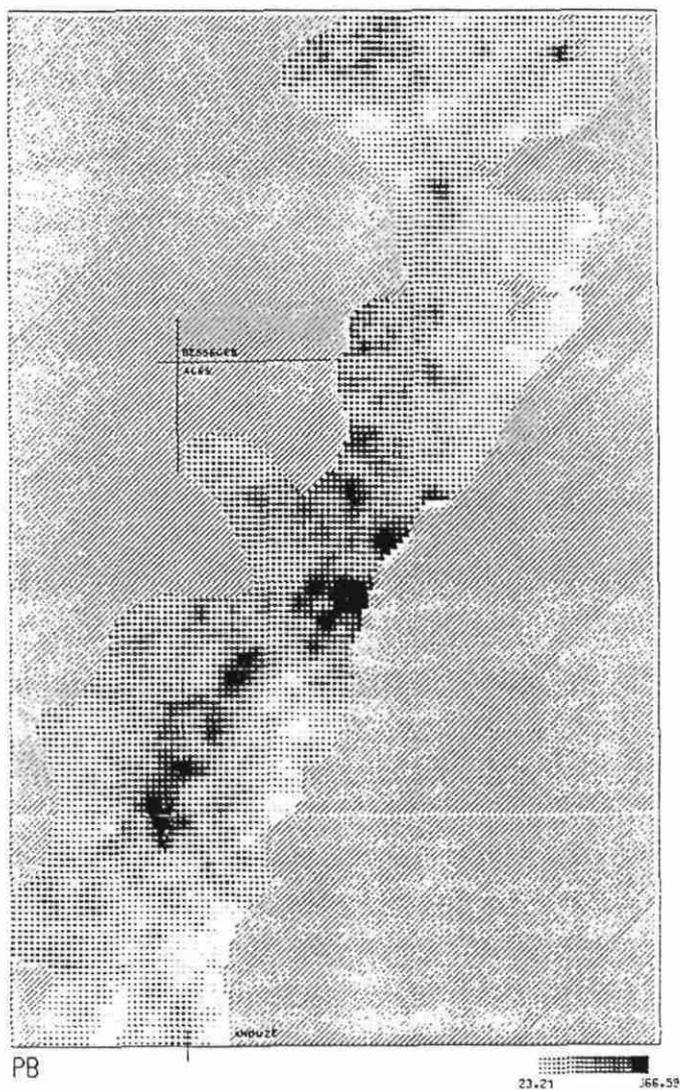


FIG.9. LE PB ET LE ZN DE LA BORDURE CEVENOLE.

Le fer : l'alimentation en minerais de fer des hauts-fourneaux d'Alès provenait principalement des minières dont les formations ferrugineuses étaient composées de limonite issue de l'oxydation des sulfures de fer. Le principal gisement était situé à Valat Pellet.

3. CONTEXTE STRUCTURAL DES INDICES ET DES GITES.

Les principaux indices miniers Pb-Zn-(Fe) se situent dans un contexte linéaire que l'on peut synthétiser par le tableau 1 :

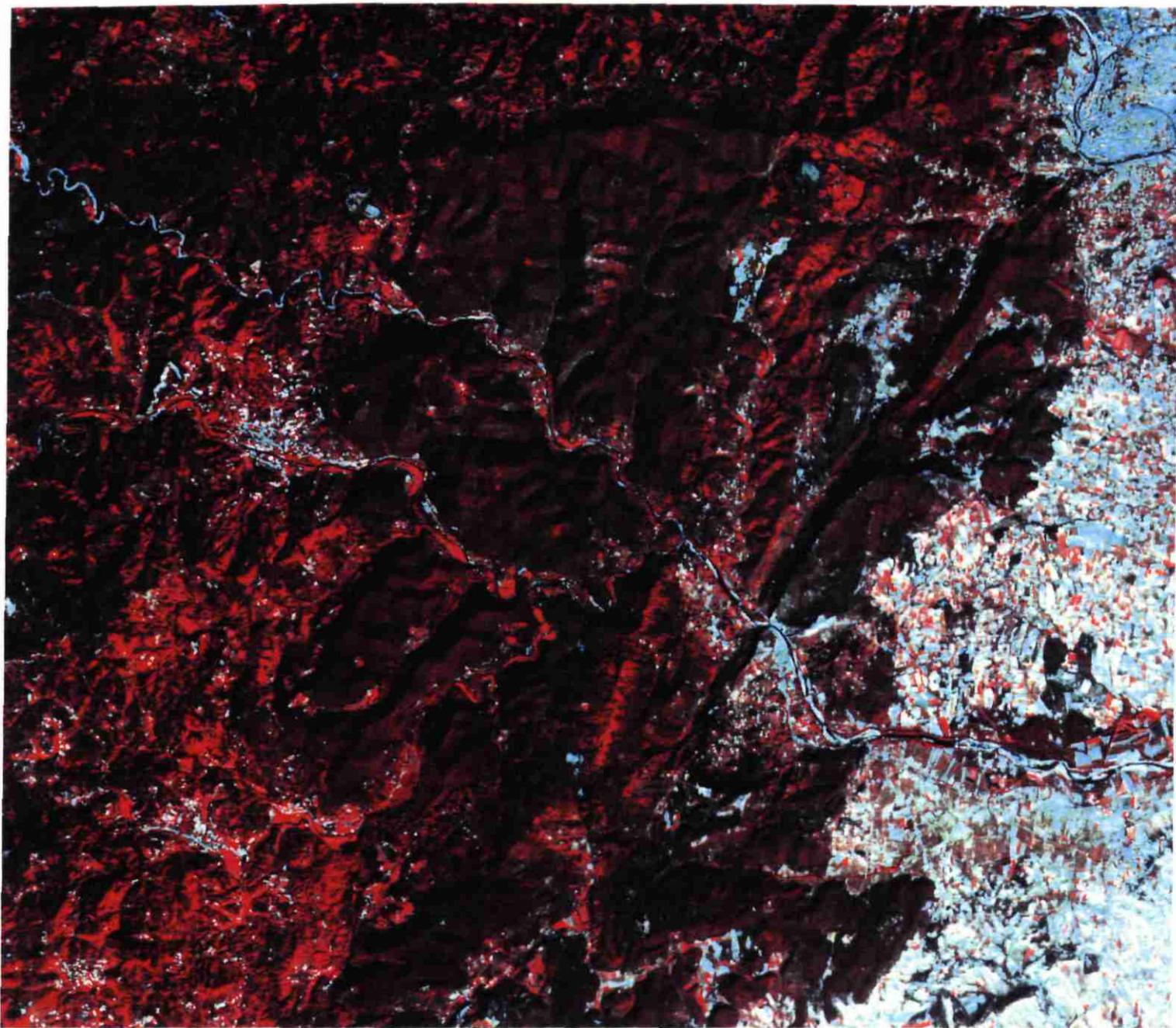
TABLEAU 1.

Directions:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-S				*	*	*			
NNE-SSW		*	*	*					
NE-SW								*	*
E-W	*						*		
ESE-WNW									
SE-NW	*						*		
SSE-NNW		*				*			

(1) Saint-Jean-du-Pin, (2) Carnoulès, (3) La Ferrière, (4) La Vieille Montagne, (5) Valleraube-Mine Joseph, (6) La Baraque, (7) Saint-Félix-de-Pallières, (8) Valensole, (9) Le Mas d'Arnaud. Ces indices sont reportés sur la carte 1.

On note la forte présence de la direction cévenole (NE-SW à NNE-SSW), ce qui est classique, mais aussi l'influence des autres directions (N-S notamment).

Dans le détail, la carte télé-analytique levée à partir de SPOT (pl.I & carte 1) souligne l'importance des directions E-W et N-S ; celles-ci constituent des faisceaux linéaires qui se recoupent sans décalage apparent. On note que les occurrences 3, 4, 5, 6 et 7 sont situées à l'intersection d'une fracturation d'azimuts N-S et E-W.



BASSIN DE MIALET-CEVENNES

0 5 10
_____ km

N
↑

PL. COUL. 1 IMAGE SPOT XS SUR LE BASSIN DE MIALET.

4. INTERPRETATION.

Le faisceau NW-SE, qui aligne la vallée du Gardon de Saint-Jean, siège d'une anomalie gravimétrique majeure, correspond au prolongement méridional de la faille du Peyrou reconnue dans le massif du Mont Lozère, et impliquée dans les phases fragiles de la tectonique tardi-hercynienne (DEROIN *et al.*, 1990a).

Les grands trains linéamentaires N-S traduisent la direction subméridienne de la famille de la faille de Villefort (Dislocation regordane) et de ses satellites orientaux. Ils affectent le socle comme la couverture.

La direction cévenole est limitée à la bordure (horst de Pallières) et au bassin de Mialet. Elle est absente du socle cristallin et cristallophyllien. Elle n'influence les aires minéralisées que par des manifestations secondaires (petits accidents, occurrences 3 et 4).

La direction E-W, quant à elle, limite les dépôts du bassin de Mialet, au nord ; au sud, le faisceau observé correspond au prolongement de la faille du Vigan.

* * *

IIIEME PARTIE

*** * ***

LES MALINES

1. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.

La mine des Malines est localisée à l'extrémité méridionale des Cévennes, dans le horst de Saint-Bresson. Elle débute dans les terrains cambriens ; les galeries atteignent la couverture mésozoïque quelques hectomètres plus au sud (ORGEVAL, 1976).

La mine ferme le 20 décembre 1991. Il est donc nécessaire de retrouver des contextes métallogéniques aussi favorables dans une aire étendue au détroit des Causses (Causse de Larzac). Il convient principalement de suivre sous la couverture l'allure du socle métamorphique (cordillères ?) constitué de formations d'âge paléozoïque inférieur.

2. CARTOGRAPHIE A PARTIR DE SPOT-P.

La donnée SPOT panchromatique a été utilisée afin de disposer d'un maximum d'extension vers l'ouest, au-delà du Caylar, couvrant ainsi 600 km² supplémentaires par rapport à la donnée en mode multispectral (pl.2).

L'échelle d'interprétation est le 1/50 000 (carte 2). La méthode de télédétection synthétique utilisée ici a été développée dans DEROIN (1990).

Les unités lithologiques sont numérotées de 1 à 138. Une comparaison à la cartographie régulière à 1/50 000 (feuilles : Le Caylar, Nant, Le Vigan, Saint-Martin-de-Londres, Lodève, Montpellier) permet d'attribuer à chacune son contenu stratigraphique. Les unités se répartissent sur 64 lithostratigraphies :

- formations superficielles : 7
- basalte : 1
- Cénozoïque : 2
- Crétacé (Néocomien) : 4
- Jurassique supérieur : 21
- Jurassique moyen : 10
- Jurassique inférieur : 9
- Trias : 6
- Paléozoïque (unités du Viganais) : 1
- Schistes épizonaux : 3

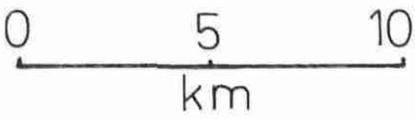
Dans le détail les différentes unités reconnues correspondent à :

Stériles des Malines (128), alluvions (9, 106 et 114), alluvions anciennes (72, 78 et 79), formations de pentes et éboulis (44 et 71), éboulis vifs (2), cône de déjection (34), dépôts résiduels (1 et 40), basalte (4), Oligocène (73 et 81), Eocène (75), n_{3a} (83), n_{2a} (124), n_{1b-2M} (82), n_{1a} (101 et 127), j^{9AR} (30, 63, 69 et 88), j^{9D} (6 et 64), j⁹ (67 et 90), j⁸⁻⁹ (123), j^{8R} (26 et 91), j^{8D} (20, 31, 68, 102, 126 et 131), j^{8b} (21, 24 et 33), j^{8a} (54 et 56), j⁸ (24, 29, 53, 58, 62, 89, 97, 121 et 135), j^{7-j^{8a}} (136), j⁷⁻⁸ (138), j⁷ (22, 23, 27, 55, 57, 92, 116, 122 et 132), j⁶⁻⁷ (108), j^{6D} (65 et 77), j^{6b} (7 et 51), j^{6a} (28), j⁶ (49, 52, 61, 76 et 95), j⁵⁻⁹ (74 et 129), j⁵⁻⁶ (87 et 111), j³⁻⁷ (104), j³⁻⁶ (103), j³⁻⁵ (96, 99 et 109), j²⁻⁶ (134), j^{2c} (93), j^{2b} (12, 13, 47, 59 et 115), j^{2a} (5 et 14), j² (46, 70, 84 et 85), j^{1b-2a} (19), j^{1b} (60), j^{0-1b} (3, 15 et 94), l_{9-j₂} (107), l_{9-j₁} (100), l₈ (16), l₆₋₉ (112), l₃₋₄ (80), l₁₋₈ (8 et 66), l₁₋₅ (113), l_{1-2-j₆} (137), l₁₋₂ (17, 86, 98, 105, 118, 130 et 133), t₁₀₋₁₅ (120), t_s (110), t₇₋₉ (32, 36, 42 et 48), t₄₋₅ (37), t₃₋₉ (10, 41 et 45), t₃₋₅ (43), r_{1b} (38), schistes a-b (35), schistes (119), Cambrien métamorph. (39).

On notera qu'un certain nombre de plages n'est pas attribué ou bien que de vastes secteurs correspondent à une même rubrique (91 et 108, par exemple). Ces secteurs seront revus ultérieurement, en relation notamment avec la cartographie de la dolomitisation.



path: 47 row: 262 num.id: MALINES-HORST ST BRESSON
exposition:29/09/86



N
↑

PL. COUL. 2 IMAGE SPOT XS SUR LE HORST DE SAINT-BRESSON
ET LA SERANNE.

3. APPORT A LA CONNAISSANCE GEOLOGIQUE REGIONALE.

L'analyse lithologique détaillée apporte des précisions sur la dolomitisation affectant les terrains carbonatés du Larzac. En combinaison avec le radar, ces informations seront exploitées ultérieurement afin de mieux comprendre les relations entre l'occupation du sol et la nature chimique des roches. Une phase de terrain sera nécessaire ainsi que des analyses de roches.

C'est donc l'analyse de fracturation qui guide notre approche régionale. De grandes zones de fractures sont perçues (Fig.10) :

- la faille E-W de l'Arre, prolongement de la faille du Vigan ;
- la faille E-W des Malines ;
- la faille NE-SW de Saint-Michel, qui s'infléchit vers le nord à l'approche du horst de Saint-Bresson ;
- la faille N-S d'Avèze-Montdardier (horst Saint-Bresson) et son prolongement dans la couverture ;
- le faisceau cévenol NNE-SSW ;
- la faille de la Vernède, NNW-SSE, entre Saint-Michel et la Séranne, qui participe à une structure linéamentaire.
- etc.

La trame de grande fracturation levée sur le Larzac permet de préciser le schéma tectonique régional présenté dans DEROIN (1990) et CHOROWICZ *et al.* (1991). On distingue :

(1) Un domaine situé à l'ouest de la faille méridienne d'Avèze-Montdardier, caractérisé par de grandes failles N-S/NNE-SSW et E-W, ces dernières (prolongement vers l'ouest de la faille des Malines et faille de l'Arre) étant décrochées en jeu senestre par les premières. Le décrochement est d'amplitude kilométrique. Dans le secteur du Caylar-La Vernède un réseau de fractures NW-SE traverse les grandes failles de Saint-Michel et bute sur la Séranne.

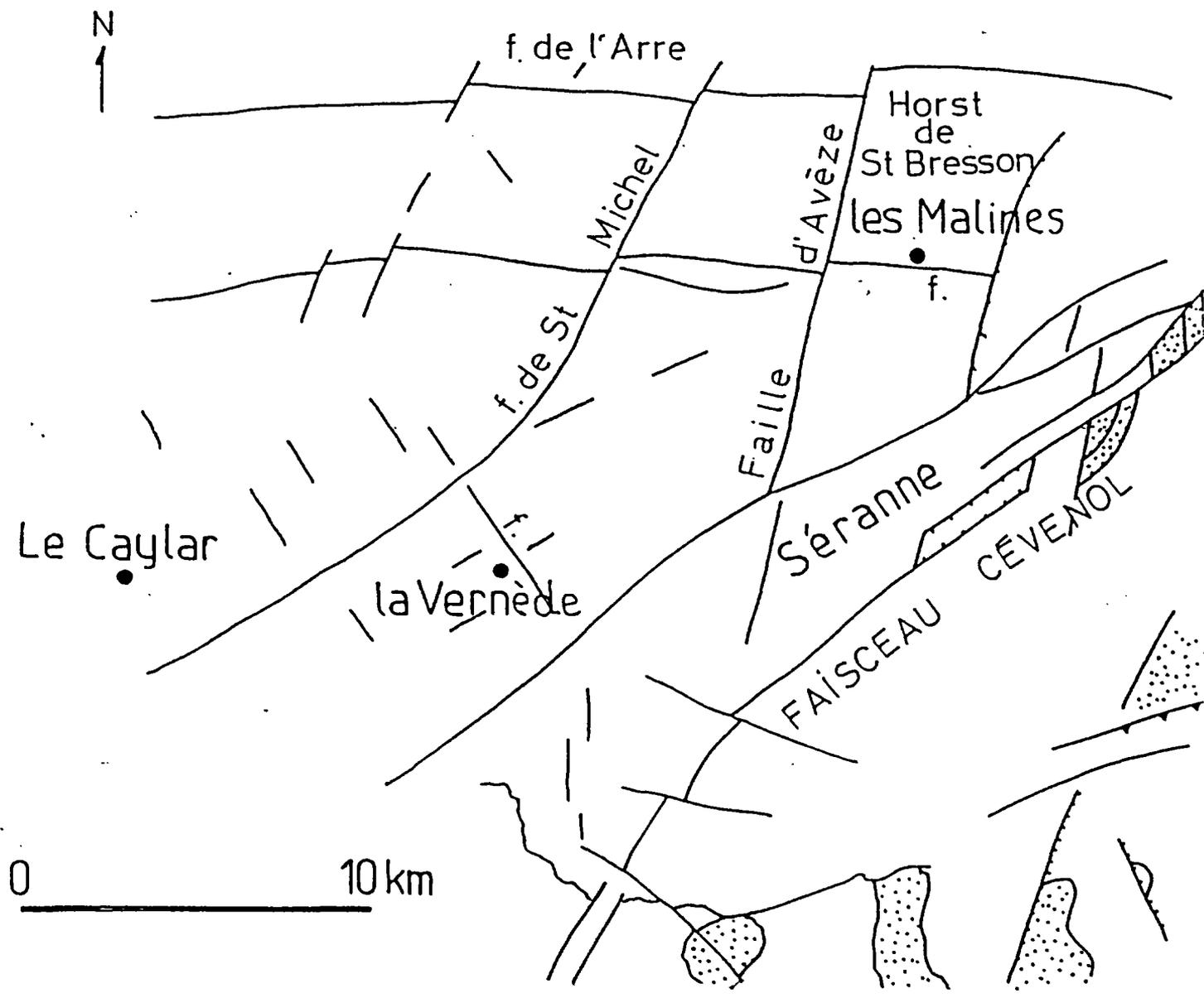


FIG.10. SCHEMA STRUCTURAL DU DETROIT DES CAUSSES.

(2) Un domaine situé à l'est de la faille d'Avèze-Montdardier, essentiellement influencé par le faisceau cévenol. Les accidents N-S sont repris dans la tectonique de la Montagne de la Séranne. Il n'y a pas de failles E-W et NW-SE.

La différence de réseau linéaire traduit vraisemblablement une différence de structuration du substratum dans les secteurs concernés. Cette variation peut être en relation avec la nature lithologique de ce substratum (granites, schistes, autres ?).

4. LES DONNEES DU RADAR E-SAR.

Des données aéroportées du radar allemand E-SAR ont été acquises sur le site de la Vernède en cours de réalisation de ces travaux préliminaires sur le seuil caussenard. Il est important d'en rappeler les grandes lignes (DEROIN et RUDANT, 1991).

Les enregistrements couvrent environ 12 km² centrés sur le hameau de la Vernède, au coeur de la zone d'étude. On essaie de quantifier (tableau 2) la perception de différents objets géologiques et/ou d'occupation du sol en fonction de la bande de fréquence (X ou C).

TABLEAU 2.

	BANDE X	BANDE C
		*** perception excellente
		** perception moyenne
		* perception médiocre
		- pas de perception
Formations résiduelles	-	***
Fracturation	*	**
dont Structures NE-SW	*	***
Effets de pente	*	**
Morphologie	-	**
Lithologies	*	**
Bancs-repères	-	*
Pendages	-	-
Bosquets, allées d'arbres	**	-
Parcellaire	***	*
Habitats	**	**
Routes (bitume)	*	*
Chemins (terre battue)	*	**

La bande C est donc préférable pour la cartographie des états de surface. La bande X, moins performante pour la géologie, est supérieure pour l'occupation des sols.

Une carte est établie en utilisant la bande C dont les premières analyses ont montré qu'elle est *a priori* le meilleur document pour la géologie.

On décrit 12 faciès-image caractérisés, entre autres, par leur teinte et leur rugosité (cf. détails dans Rapport du GARS Larzac, DEROIN et RUDANT, 1991) :

1. Généralise les aires d'altération (terre du causse).

GARS LARZAC.

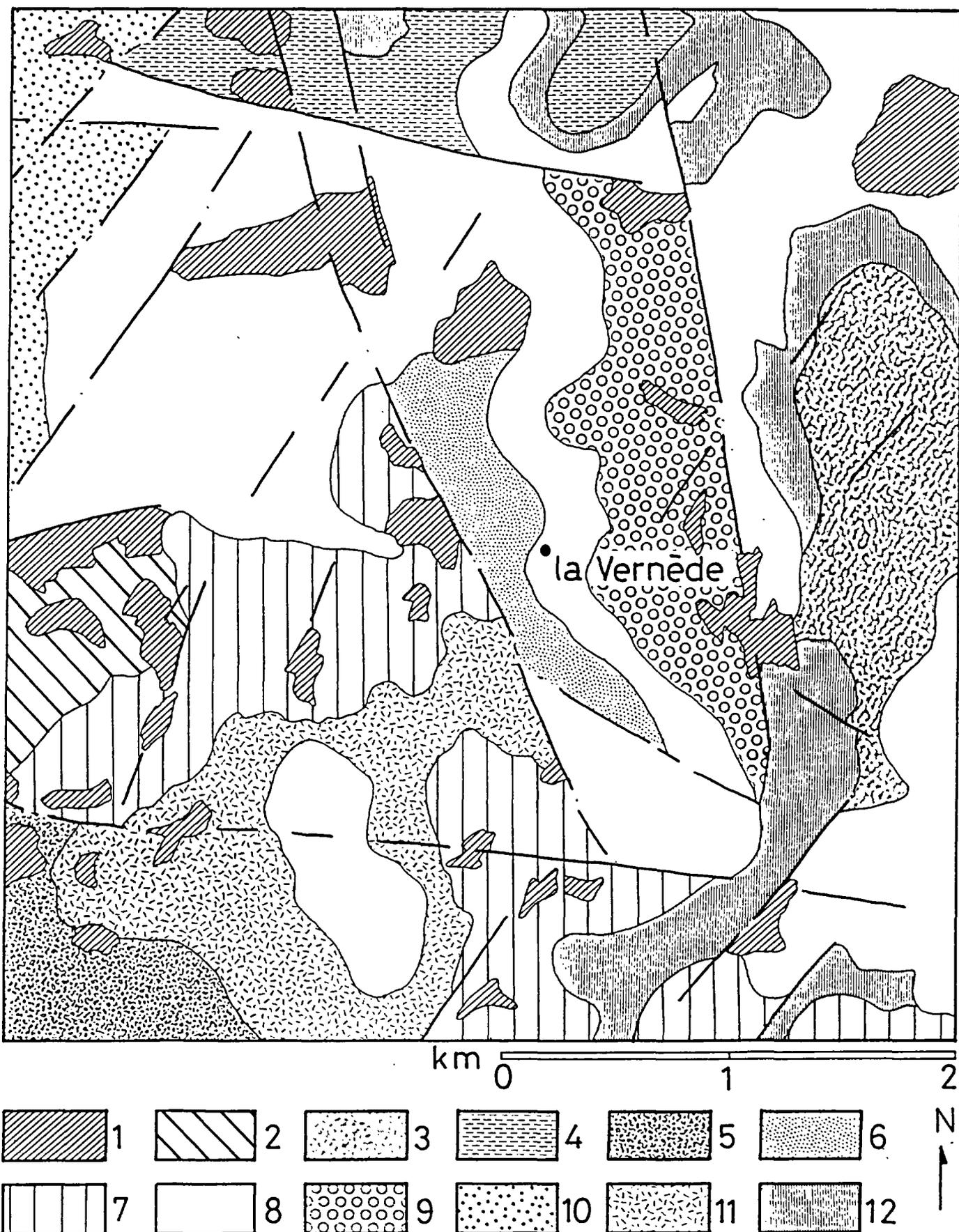


FIG.11. INTERPRETATION DES FACIES-IMAGE RADAR.

8 et 12. Faciès de dolomitisation précisant les secteurs à couvert végétal important et les secteurs de pierrailles.

3. Correspond à j^{8R}.

9. Correspond à j^{9AR}.

6. Correspond pour l'essentiel à j⁸.

7. Correspond pour l'essentiel à j⁷.

11. Correspond pour l'essentiel à j^{8a}.

2,5 et 10. Ces faciès sont étroitement dépendants de leur situation en bordure de scène et correspondent à des distinctions purement radiométriques (plus sombres) des faciès 7, 8, 11, etc.

On retrouve aussi bien les accidents connus sur le terrain de direction N-S qu'E-W, ce qui montre, dans ce cas, la faible importance de la direction du signal.

Une famille de fractures NE-SW jalonne, à intervalle régulier — au moins au NW —, l'ensemble de la scène. Cette famille n'est pas relevée sur la carte géologique régulière, et n'apparaît pas sur les documents aériens panchromatiques et infrarouge couleur, ni sur les données de SPOT en mode panchromatique. Cependant, la signification géologique de ce système de linéaments apparaît lorsque l'on replace le site-test dans le contexte régional. De part et d'autre existent deux grands accidents de direction NE-SW, la faille de Saint-Michel au NW, le faisceau cévenol au SE. On interprète alors ces directions perçues exclusivement sur le radar comme l'expression, dans la morphologie, d'accidents profonds (socle) n'affectant pas la couverture sédimentaire en rupture fragile. Les alignements correspondent à des pentes structurales que l'on retrouve à la lecture des pendages (faibles) notés sur la carte géologique.

* * *

CONCLUSION GENERALE.

L'interprétation des données SPOT en mode multispectral et panchromatique (stéréoscopie) a été effectuée sur deux secteurs d'exploration minière des Cévennes : Mialet et les Malines.

L'étude a été commencée en 1990 et sera développée au cours du programme RM 63 financé par la Direction Scientifique du BRGM (1991 et 1992).

Les premières analyses seront confrontées aux données de la géophysiques et des autres expérimentations. Certaines hypothèses structurales devront être appuyées sur des données de terrain, notamment par référence à la structuration du substratum affleurant. D'ores et déjà, les principales informations concernent :

- (1) La structuration du substratum du détroit des Causses dont l'étude détaillée — confrontée aux sondages — devrait permettre de préciser les modalités ; importance des accidents N-S et E-W, ainsi que NW-SE ; importance toute particulière de la faille d'Avèze-Montdardier, qui semble séparer deux domaines à structuration contrastée ;
- (2) L'étude des phénomènes de dolomitisation en relation avec les états de surface ; importance des données radar ;
- (3) La perception de la direction structurale NE-SW non exprimée en fracturation fragile dans le secteur de la Vernède ;
- (4) La détection de linéaments NW-SE dans le bassin de Mialet corrélés avec la géophysique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

AUBAGUE M., COUMOUL A., LEBAS R., MACQUAR J.-Cl. et SUREAU J.-Fr. (1988). Géologie des minéralisations Fe-Zn-Pb de l'Hettangien du horst de Rochebelle-Fontanes (bordure cévenole, secteur Nord-Alès, Gard). *Chron. rech. min.*, 493, p.5-32.

AUBAGUE M., ORGEVAL J.-J. et SOULIE M. (1977). Les gîtes minéraux de la terminaison méridionale du Massif central et de sa bordure languedocienne (essai de synthèse). *Bull. BRGM*, II, 3, p.139-181.

BERGERAT Fr., BOTHOREL A. et CHOROWICZ J. (1985). Evaluation du traitement en composantes principales des images MSS LANDSAT pour la cartographie géologique. Application à l'analyse structurale de la région ardéchoise. *Ann. Soc. géol. Nord*, tome CV, p.47-57.

BLUSSON A. (1985). Etude structurale du faisceau de failles des Cévennes (France) à l'aide de données multiples : télédétection, terrain, géophysique. *Thèse Paris-Sud (Orsay)*, 104 p.

BONIJOLY D. et DELPONT G. (1982). Etude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par télédétection et la géologie structurale. *Documents BRGM*, 46, 40 p.

BROSSE J.-M. (1975). La télédétection en géologie structurale. deux exemples: le massif granitique de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) et le système filonien de Vialas (Lozère) (Massif Central, France). *Thèse Orléans*, 132 p.

BROSSE J.-M., BERTHIAUX A., DUTARTRE Ph., IMBAULT M., SCANVIC J.-Y. et DEROIN J.-P. (1989). Evaluations de simulations de l'instrument HRG en vue d'optimiser la stéréoscopie dans la perspective d'application géologique. *Rapport BRGM*, R 30095, TED DT 89, 11 p.

CARRERE V. (1987). Exploitation des données multisources et traitement d'images en cartographie géologique. Contribution à un problème structural régional : la liaison Pyrénées-Provence. *Thèse d'Etat Univ. P.-et-M.Curie, Paris*, 2 vol., 263 p.

CAZABAT Ch. (1975). Topologie ertsienne de la France. Premiers résultats. *Bull. Soc. fr. Photogramm.*, 60, p.21-36.

CHARPAL O. de, TREMOLIERES P., JEAN F. et MASSE P. (1974). Un exemple de tectonique de plate-forme : les Causses Majeurs (Sud du Massif Central, France). *Revue Inst. Fr. Pétrole*, XXIX, 5, p.641-659.

CHOROWICZ J. (1984). Intérêt de la cartographie géologique à petite échelle à partir d'images spatiales dans le Sud-Est de la France. *Bull. Centre Géomorph.*, CNRS, Caen, 28, p.83-85.

CHOROWICZ J., DEROIN J.-P., GESS G., HUGER J., BECUE B., CURNELLE R., PERRIN G. et RONFOLA D. (1991). A methodology for the use of SPOT imagery in oil exploration. Example of the Bas-Languedoc exploration permits area (France). *Int. J. Remote Sensing*, 12, 10, p.2087-2108.

DEROIN J.-P. (1987). Méthodologie d'utilisation de l'imagerie SPOT. Cartographie géologique télé-analytique. Analyse et interprétation tectonique. Application aux permis pétroliers du Bas-Languedoc. *Mém. DEA Géodynamique Univ. Paris 6*, 41 p.

DEROIN J.-P. (1988). Cartographie géologique télé-analytique du couple de scènes stéréoscopique SPOT 1-HRV — KJ.047.261. Alès-Mont Lozère. *Rapport BRGM*, 88 DT 047 TED, 75 p.

DEROIN J.-P. (1989). Reconnaissance et modélisation d'objets géologiques pour l'intégration de critères d'environnement dans les classifications multi-paramétrées. Application au Sud-Est du Massif Central français (Cévennes, Margeride, Bas-Languedoc). Méthodologie de l'analyse interdisciplinaire. *Rapport BRGM*, R 30191 TED DT 89, 336 p.

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. P. et M. Curie (Paris 6)*, UFR des Sciences de la Terre, 19, 293 p.

DEROIN J.-P., BECQ-GIRAUDON J.-Fr. et PROST A.E. (1990a). Fracturation tardi-hercynienne et détritisme associé : chronologie des événements dans les massifs granitiques cévenols affectés par la Faille de Villefort (Mont Lozère et Borne, Massif Central, France). *C.R. Acad.Sci., Paris*, 311, II, p.865-871.

DEROIN J.-P. et CHOROWICZ J. (1989). Méthode d'établissement de cartes géologiques synthétiques. Exemple du Bas-Languedoc (France). *Revue Photo-Interprétation*, 3-4, 6.

DEROIN J.-P., CHOROWICZ J., DEROIN Th., DUTARTRE Ph., SCANVIC J.-Y. et SIMONIN A. (1990b). The Landscape-Unit Approach applied to geology, on SPOT images, in temperate climate zones ; using a test-area in the Cévennes (Massif Central, France). *J. Photogramm. and Remote Sensing*, 45, p.382-403.

DEROIN J.-P. et RUDANT J.-P. (1991). Radar Gars 2000. Sous-groupe "géologie". Site du Larzac. Application pour la cartographie des états de surface en relation avec la géologie. *Rapport BRGM*, R 32504, 35 p., 9 fig., 7 pl.

DEROIN J.-P. et TAMAIN A.L.G. (1990). SPOT Data and the Montpellier igneous rocks as keys to a new large-scale tectonic interpretation of the Bas Languedoc (France). *J. Photogramm. and Remote Sensing*, 45, p.404-418..

DUPLAN L. (1973). Les grands linéaments de la France. *C.R. Acad.Sci., Paris*, 276, p.2947-2949.

GALMIER D., FUCHS Y. et SAMAMA J.-Cl. (1966). Exemples d'applications de la photogéologie à la détection des gisements stratiformes enfouis. *Actes IIème Symp. int. Photo-Interprétation, Paris*, IV-1, p.35-50.

GUILLEMOT J., GUY M. et LOBJOIT M. (1973). Un système cohérent d'alignements structuraux commun aux Alpes et aux Pyrénées mis en évidence par le satellite ERTS 1. *C.R. Acad.Sci., Paris*, 277, p.481-484.

FONTANEL A., LALLEMAND Cl., LEGENDRE G., RIVEREAU J.-Cl. et THOMAS G. (1976). Comparaison des images et des classifications multispectrales obtenues à partir des satellites Landsat, Skylab et du Scanner aéroporté Daedalus. *Journées Télédétection*, 26-28 octobre 1976, t. II, p.499-539.

LETOUZEY P. et CRUZ de la F. (1980). Etude géologique comparative des enregistrements radar Goodyear (bande X) et JPL (bande L) sur le site-test des Vans. *Bull. Soc. fr. Photogramm. Télédét.*, 79-80, p.49-55.

LETOUZEY P. et XAVIER J.-P. (1981). Utilisation de SPOT en géologie structurale. Essai sur les zones de Montpellier et de Camarès. *Rapport IFP*, 28820, 24 p.

ORGEVAL J.-J. (1976). Les remplissages karstiques minéralisés : exemple de la mine des Malines (Gard, France). *Mém. h. sér. Soc. géol. Fr.*, 7, p.77-83.

SCANVIC J.-Y. et WEECKSTEEN G. (1980). Notice explicative de la carte des linéaments de la France à 1/1 000 000. *Documents BRGM*, 14, 14 p.

VERGELY P. et ZADEH-KABIR H. (1988). Etude par photo-interprétation comparée de la région de Largentière - Les Vans (Languedoc septentrional, France): utilisation des photographies aériennes, des images par satellites et des images radar. *Bull. Soc. géol. Fr.*, IV, p.303-314.

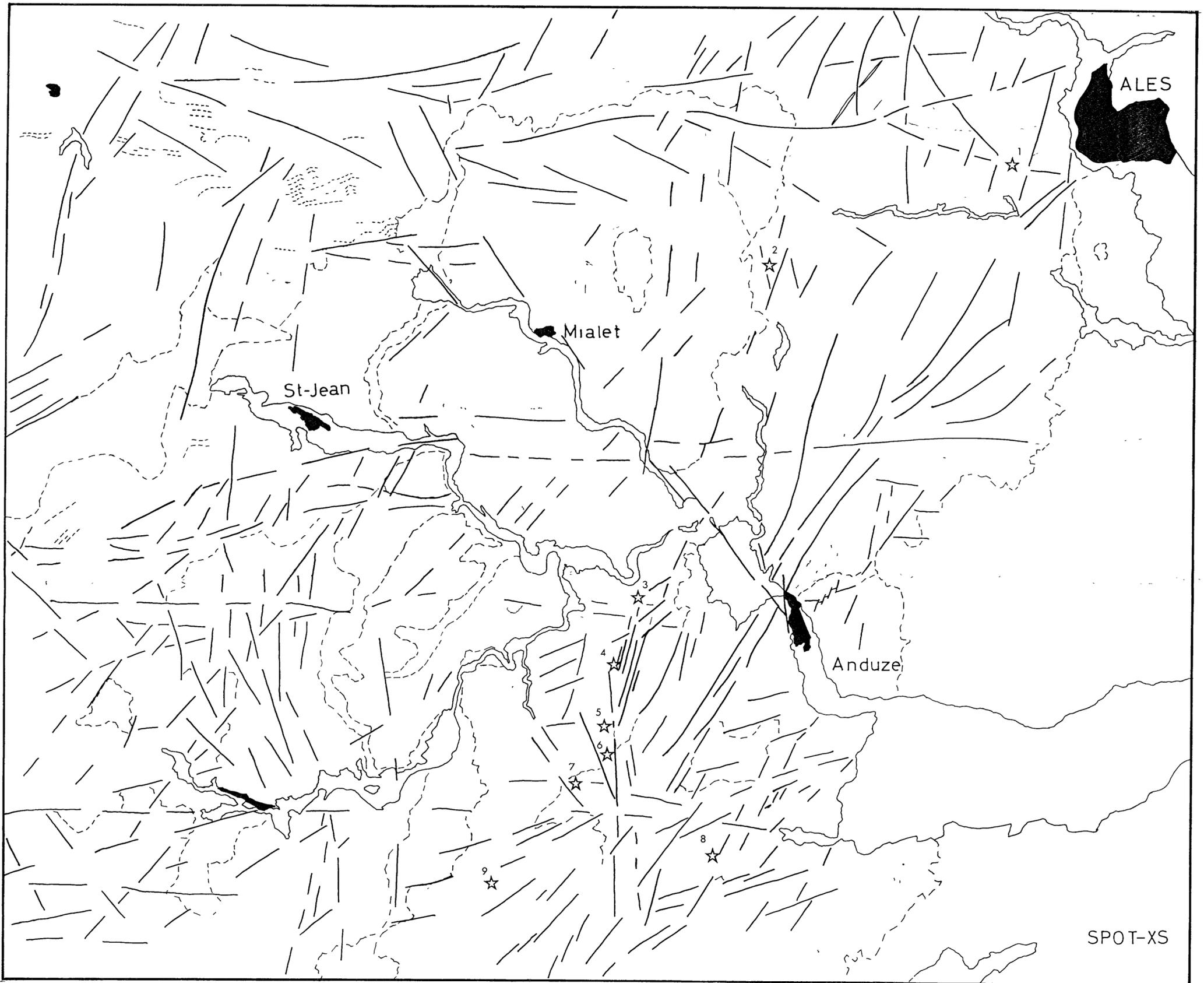


Carte 1

Structure-MIALET

- faille-image
- banc-repère
- ★ indice minier

0 1 2 3 4 5 km



Ngéo



0 km 5

CARTE 2
LES MALINES
Lithofaciès et structures

SGNTED 31940
décembre 1991

-  faille-image
-  bancs-repère
-  lithofaciès
[1-138 cf texte]

