



**les terres rares  
dans les formations cambriennes  
des Cévennes et de la Montagne-Noire  
(Massif central français)**

---

**M. Laval  
J.P. Prian  
A.M. Hottin  
J.J. Orgeval**

**novembre 1990  
R 31 672**

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

LAVAL M., PRIAN J.P., HOTTIN A.M., ORGEVAL J.J. (1990) - Les terres rares dans les formations cambriennes des Cévennes et de la Montagne-Noire (Massif central français). Rap. BRGM R31672 DEX-DAM-90, 40 p., 11 fig., 1 tabl.

## RESUME

Les dolomies cambriennes de la région du Vigan recèlent des niveaux phosphatés de 2 à 3 m de puissance, connus depuis longtemps pour leur très forte radioactivité (U : 2000 ppm ; Th : 1500 ppm) mais dont le contenu en terres rares n'avait pas encore été analysé. Par ailleurs, des niveaux phosphatés d'âge équivalent, sur le versant nord de la Montagne-Noire, leur ont été comparés.

En Montagne-Noire, les phosphates sont localisés dans des niveaux peu épais de calcaires ou de shales noirs à phosphoclastes et nodules centimétriques pauvres en uranium (10-40 ppm) et thorium (5-20 ppm). Leur contenu en terres rares varie de 300 à 2100 ppm, avec une distribution dans laquelle l'anomalie négative en cérium peut être interprétée comme la marque d'une influence marine.

Dans les Cévennes, les phosphates, au contraire, constituent des niveaux puissants et discontinus. Ils sont très riches en uranium (1000 à 2200 ppm) et thorium (1000 à 1800 ppm) et ont un contenu en terres rares compris entre 1700 et 2500 ppm. Leur spectre se caractérise par un enrichissement très marqué en terres rares lourdes. On retrouve ce caractère (avec la richesse en U et Th) dans les dolomies encaissantes, où il semble bien que les terres rares soient portées par les phosphates. Ce lien géochimique entre phosphates et carbonates, ajouté à la morphologie des corps, conduit à envisager, pour ces phosphates, une origine résiduelle dans des paléokarsts pour ces phosphates.

Il semble donc qu'il n'y ait aucun lien génétique entre les phosphates de chacun des deux sites étudiés ; en Montagne-Noire, ils sont franchement d'origine marine alors que ceux du Vigan seraient plutôt formés en milieu non marin, par précipitation chimique secondaire dans un milieu confiné.



**TABLE DES MATIERES**

INTRODUCTION.....	7
1. CADRE GEOLOGIQUE .....	8
1.1. Cadre géologique du Cambrien du secteur du Vigan.....	8
1.2. Cadre géologique du Cambrien du versant nord de la Montagne-Noire.....	8
2. ECHANTILLONNAGE ET METHODES ANALYTIQUES .....	9
2.1. Echantillonnage .....	9
2.2. Méthodes analytiques .....	14
3. LES HORIZONS PHOSPHATES .....	15
3.1. Présentation comparée des horizons phosphatés .....	15
3.2. Eléments majeurs .....	15
3.3. Teneurs en uranium, thorium et terres rares des horizons phosphatés.....	17
4. LES HORIZONS CARBONATES .....	21
4.1. Eléments majeurs .....	21
4.2. Les teneurs en uranium, thorium et terres rares dans les carbonates.....	21
5. LES HORIZONS DES SHALES NOIRS.....	25
5.1. Eléments majeurs.....	25
5.2. Eléments traces et terres rares.....	25
6. LES ROCHES VOLCANIQUES ET FACIES TUFACES.....	27
6.1. Les faciès des Cévennes .....	27
6.2. Les faciès de la Montagne-Noire.....	27
CONCLUSION.....	31
BIBLIOGRAPHIE .....	32
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	34

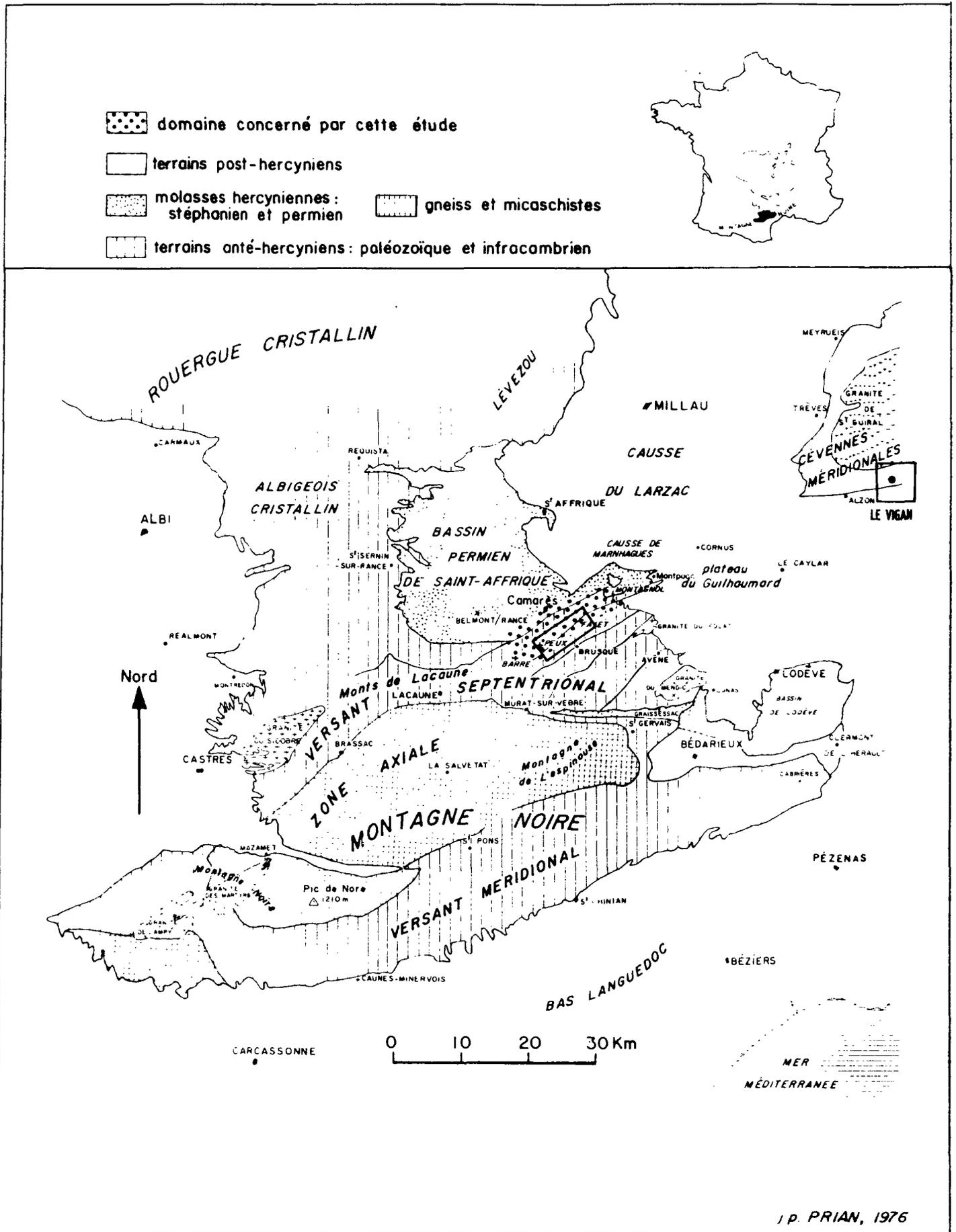


Fig. 1 - Localisation des deux zones étudiées dans le sud du Massif central français : le Vigan (Cévennes) et le versant nord de la Montagne-Noire.

## INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans une quête d'informations sur les terres rares (TR) dans les phosphates sédimentaires, dans le cadre d'un programme plus général sur la géologie de ces éléments. Dans le domaine magmatique, l'association terres rares-phosphates est bien établie et se marque par des minéraux tels la monazite, le xénotime et l'apatite qui peuvent contenir plus de 1% d'oxydes de terres rares.

L'association terres rares-éléments radioactifs est assez commune, celle-ci étant plutôt une relation terres rares-thorium. C'est précisément cette relation qui est à l'origine de la présente étude après que l'un d'entre nous (J.J. Orgeval) ait signalé l'existence d'horizons phosphatés uranifères et thorifères dans le Cambrien de la région du Vigan, autrefois explorés pour leurs éléments radioactifs. Pour ne pas limiter l'étude à un test sommaire de la présence et de la distribution des terres rares dans ces niveaux, nous avons, dans un premier temps, échantillonné les faciès volcanodétritiques schistogréseux et pélitocarbonatés des séries porteuses de ces horizons et, dans un deuxième temps, nous avons comparé ces résultats à ceux des formations stratigraphiques équivalentes du Cambrien des monts de l'est de Lacaune, sur le versant nord de la Montagne-Noire (fig. 1).

## 1. CADRE GEOLOGIQUE

### 1.1. CADRE GEOLOGIQUE DU CAMBRIEN DU SECTEUR DU VIGAN

Dans la région du Vigan, les terrains paléozoïques affleurent suivant une bande est-ouest de 50 km de longueur entre le massif granodioritique du Saint-Guiral-Liron au nord, et la couverture secondaire du Causse, au sud. La succession stratigraphique du Cambrien (Orgeval, Capus, 1978) est la suivante :

- un ensemble schisto gréseux et volcanodétritique d'âge probable cambrien inférieur ou/à infracambrien (noté K1 dans la stratigraphie régionale) ;
- un ensemble pélitocarbonaté et dolomitique d'âge cambrien inférieur (K2a) et moyen (K3) ; les dolomies du Cambrien inférieur constituent un marqueur lithostratigraphique bien connu sur les versants nord et sud de la Montagne-Noire ;
- un ensemble schistogréseux anté-stéphanien, d'âge cambrien supérieur probable (K3-4).

L'horizon phosphaté, situé dans les alternances schistocalcaires de la base des dolomies massives du horst de Saint-Bresson, est composé de lits de phosphatites et de brèches orogéniques indurées, concordantes avec la stratification, dont la continuité n'est pas démontrée.

### 1.2. CADRE GEOLOGIQUE DU CAMBRIEN DU VERSANT NORD DE LA MONTAGNE-NOIRE

Au plan structural, il s'agit du domaine des écailles des monts de l'est de Lacaune composé de terrains d'âge infracambrien à silurien. Par comparaison avec les séries du versant sud de la Montagne-Noire, le Cambrien inférieur comprend (Prian, 1980) une formation grésopélitique, dite de "Marcory" (K1), surmontée par une séquence grésocarbonatée (K1-2) qui se termine par l'épisode carbonaté des calcaires à *Archaeocyatus* (K2a). Le Cambrien moyen est essentiellement représenté par la formation des "schistes à Paradoxides" constituée de pélites à amandes calcaires et schistes versicolores, surmontée par une formation schistogréseuse (K3-4), dite de "Barroubio" d'âge cambrien supérieur probable.

Deux faisceaux phosphatés, distincts stratigraphiquement de ceux du Vigan, sont connus dans les monts de l'est de Lacaune (Prian, 1980) : l'un, dans la zone de passage des schistes noirs aux calcaires (K2a) de l'écaille de Peux, et l'autre, au sommet de la formation des pélites à amandes calcaires (K3) associée à des manifestations volcaniques acides et basiques.

## 2. ECHANTILLONNAGE ET METHODES ANALYTIQUES

### 2.1. ECHANTILLONNAGE

#### a) Dans le secteur du Vigan (fig. 2)

Quatre sites ont été échantillonnés dans un périmètre de quelques kilomètres autour du Vigan :

- sur la route D48 quittant Aulas par le nord en direction du mont Aigoual, quatre échantillons (4301 à 4304) ont été prélevés. Le Cambrien forme ici une série renversée, avec à la base des volcanites grossières à clastes centimétriques (4301) surmontées de tufs fins radioactifs (4000 cps au SPP2) d'un mètre de puissance (4302). Sur cet ensemble volcanique à volcanodétritique, reposent en concordance des dolomies jaunes et grises faiblement radioactives (500 cps) (4303-4304) ;
- à Bréau, la série est formée de calcschistes (4305) radioactifs (2000 cps), finement lités, sur lesquels reposent des dolomies claires massives (4306) surmontées de brèches à éléments tufacés et phosphatés de 2 à 10 mm cimentés par des carbonates gris (4307) ;
- à Vézenobres, les niveaux phosphatés tantôt indurés (4310), tantôt d'aspect terreux (4311-4312), sont bien développés (2,5 m de puissance). Ils sont intercalés dans des brèches dolomitiques (4309-4313-4314) parfois riches en éléments tufacés ;
- enfin, un tuf basique (4315) a été prélevé aux abords du village de Saint-Bresson.

#### b) Sur le versant nord de la Montagne-Noire (fig. 3)

Plusieurs sites ont été échantillonnés dont deux principaux : Peux et Ouyre-Haute.

Dans le secteur du Moulin-de-Peux, la série du Cambrien inférieur de Peux comprend un ensemble de shales noirs surmonté par une épaisse série de calcaires. Dans la zone de passage entre les deux termes, la série renferme des alternances de schistes parfois charbonneux (4904), calcschistes (4903), carbonates (4902), tufs phosphatés (4905) et volcanites (4907), dans lesquels sont intercalés des bancs phosphatés (4901-4908) de 30 cm de puissance constitués d'éléments gris centimétriques. Ces éléments correspondent à des portions de croûtes phosphatées (phosphatisation de hard ground) remaniées à un stade diagénetique précoce (galets mous). Les grains phosphatés sont souvent très riches en microspicules globuleux d'éponges siliceuses entièrement calcitisés ou silicifiés.

A Ouyre-Haute, les niveaux carbonatés du Cambrien moyen sont bien développés (4911-4912), alternant avec des volcanites claires (4908) riches en pyrite et des tufs carbonatés (4909) ; les niveaux phosphatés constituent de minces horizons calcaires de 10 à 12 cm d'épaisseur (4910) riches en petits éléments gris foncé issus du remaniement syngénétique de minces hard-ground ou de tapis algaires phosphatisés.



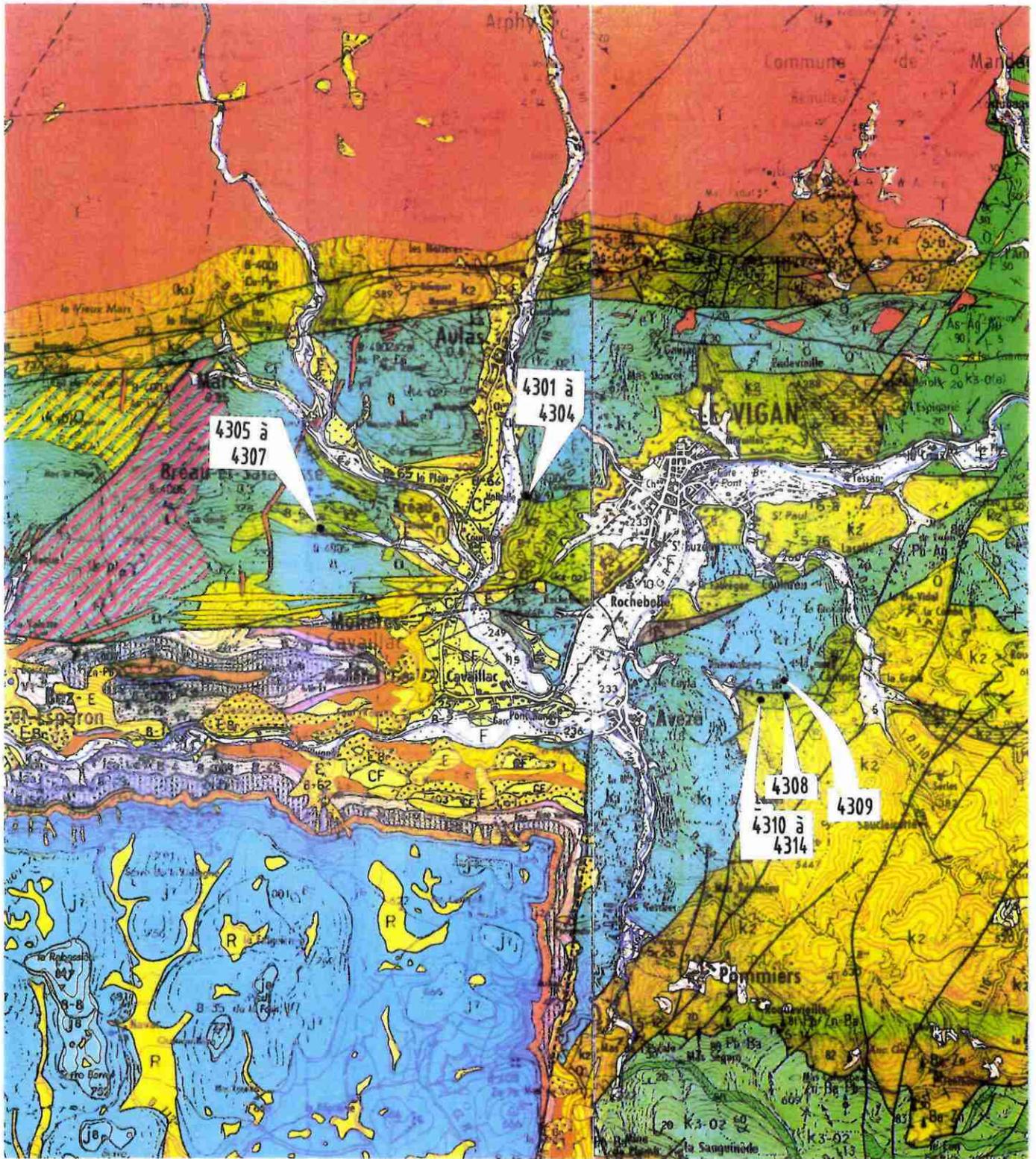
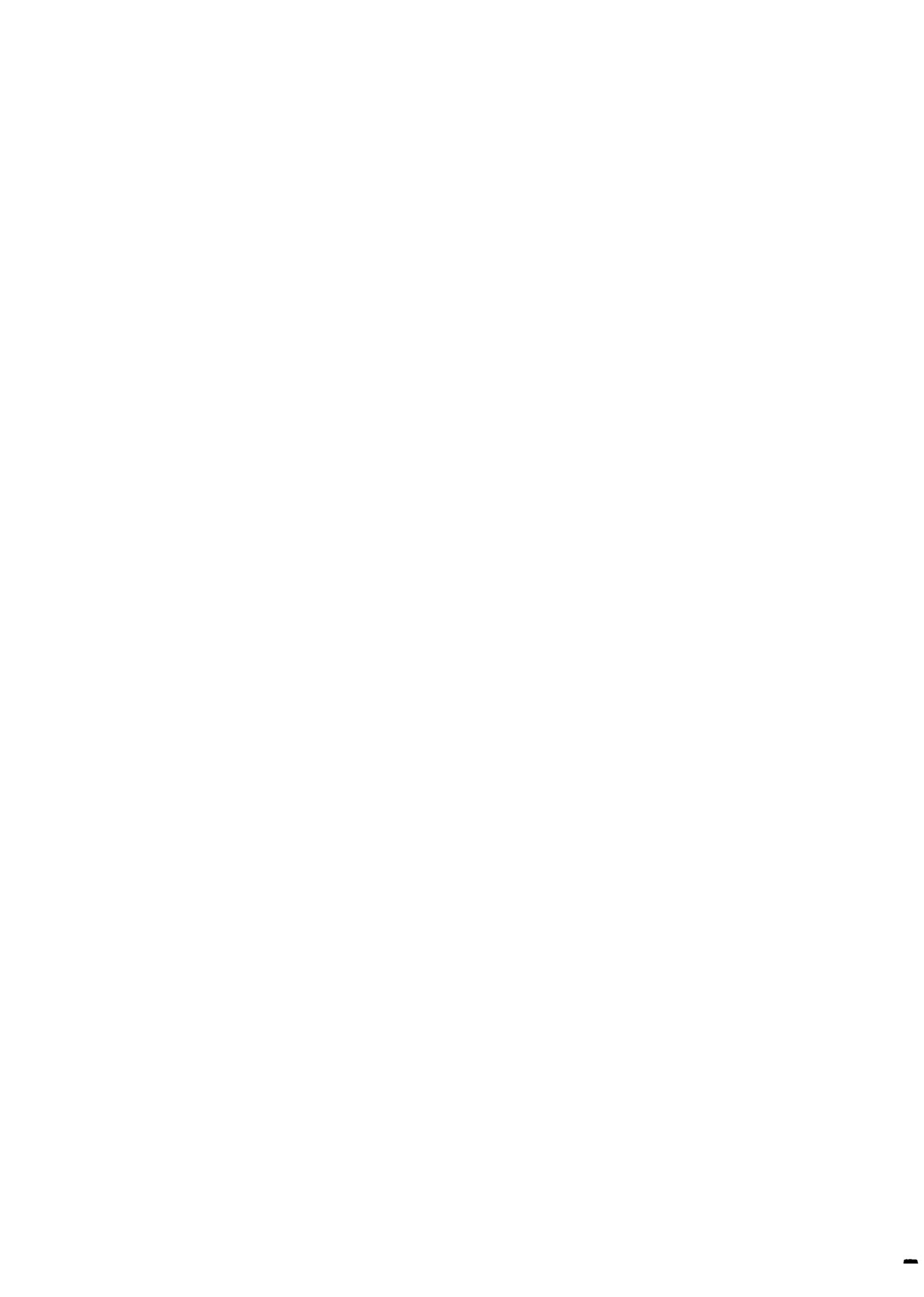


Fig. 2 - Secteur du Vigan : localités échantillonnées.



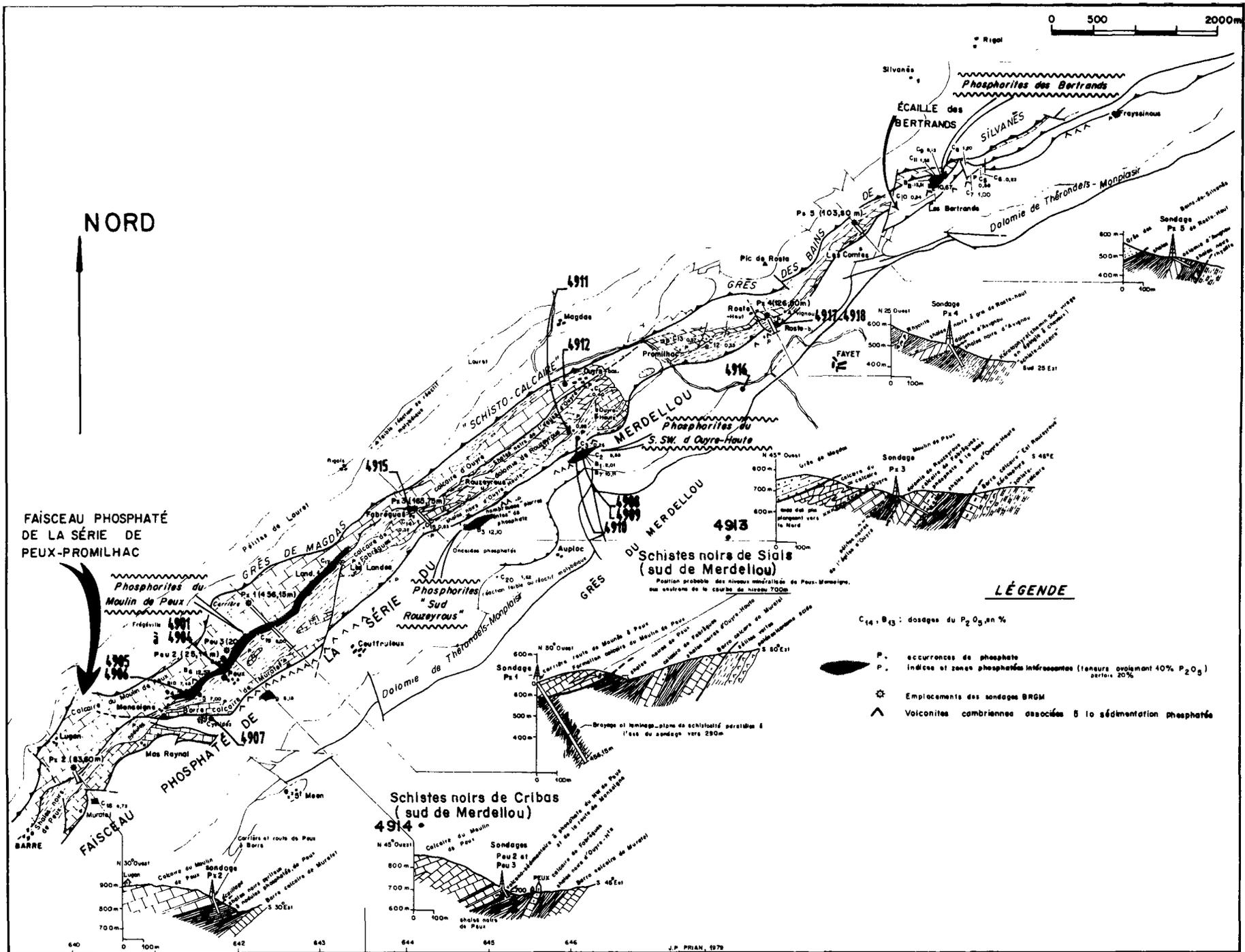


Fig. 3 - Carte géologique simplifiée de l'échelle du Merdellou (d'après Prián, 1980) : localités échantillonnées.

Des schistes noirs du Cambrien inférieur ont été prélevés dans plusieurs localités du secteur :

- à Sials (4913), au sud du Merdellou ou (4914), dans l'écaille de Brusque ;
- au nord du Merdellou, dans l'écaille de Peux-Ouyre, à Fabrègues où les pélites riches en matière organique contiennent de la pyrite (4915), et à Avignou (4917) où les nodules phosphatés (4918) atteignent 4 à 5 cm de longueur.

Les schistes noirs à nodules phosphatés sont tout à fait comparables à ceux connus dans le Cambrien inférieur de l'ouest de Lacaune, au sud-est du Sidobre (Albouy, 1975).

Signalons que régionalement, les prospections de l'"Inventaire minier national" ont mis en évidence une anomalie géochimique formationnelle sur ces niveaux de shales noirs du sommet du Cambrien inférieur, les opposant ainsi aux schistes noirs de l'Ordovicien inférieur situés à proximité (Guérangé-Loze, 1986).

## **2.2. METHODES ANALYTIQUES**

Tous les échantillons ont été analysés par fluorescence X pour les éléments majeurs et par ICP pour la plupart des éléments traces (voir annexe). Les terres rares ont été analysées par DCP (après passage sur résine échangeuse d'ions) pour les échantillons répertoriés 4301 à 4315, et par ICP/MS pour ceux numérotés de 4901 à 4918. L'uranium et le thorium ont été analysés par ICP/MS.

### 3. LES HORIZONS PHOSPHATES

#### 3.1. PRESENTATION COMPAREE DES HORIZONS PHOSPHATES

Les phosphates du versant nord de la Montagne-Noire se présentent en nodules oblongs et phosphoclastes de taille centimétrique (4901, 4906, 4918), de teinte grise, sédimentés en conformité avec la stratification générale ; ils forment des bancs d'une trentaine de centimètres de puissance, intercalés dans des séries détritiques marines fines, localement carbonatées, ou plus rarement dans des séries tufacées et effusives (4910). Localement, ils sont à grain détritique fin (4905) cimenté par un matériel riche en quartz et feldspath automorphe d'origine volcanique probable.

Dans les Cévennes, ils ont une présentation toute différente, formant des bancs massifs de 2 à 3 m de puissance (4310-4311-4312) intercalés dans une puissante série carbonatée. Ces phosphates sont formés d'apatite microcristalline évoquant un gel, dans lequel se développent des géodes à quartz et micas blancs ; ou bien l'apatite est en imprégnation (4307), toujours accompagnée de quartz et mica blanc dans des faciès bréchiques. Au contact de la minéralisation phosphatée, la dolomie présente des phénomènes d'épigénie (remplacement des rhomboèdres de dolomite par le phosphate). On est donc en présence de phosphates d'origine secondaire épigénisant un substrat carbonaté.

#### 3.2. ELEMENTS MAJEURS

Les résultats sont reportés en annexe. Les teneurs en éléments majeurs des différents échantillons de roches phosphatées montrent que peu d'entre eux méritent le nom de "phosphatite", terme généralement attribué aux échantillons contenant plus de 18% de  $P_2O_5$  (Slansky, 1980) ; seul l'horizon phosphaté du Vigan dépasse, avec ses 23 à 28%  $P_2O_5$ , cette limite. Le rapport  $CaO/P_2O_5$  de ce niveau est compris entre 1,3 et 1,4, indiquant que toute la chaux est contenue dans l'apatite. Les résultats d'analyse à la microsonde, d'une part, et les analyses sur roche totale, d'autre part (fig. 4a), indiquent qu'il s'agit probablement de fluorapatite partiellement substituée. Les teneurs relativement faibles en alumine (4 à 7%) sont en liaison avec une faible fraction argileuse, alors que la silice abondante est exprimée sous forme de quartz géodique.

Les échantillons prélevés en Montagne Noire, au contraire des précédents, ont tous (sauf l'échantillon 4919) des rapports  $CaO/P_2O_5$  très supérieurs à celui de l'apatite indiquant par là qu'une partie du  $CaO$  est dans la calcite (ce qui s'accompagne d'une augmentation de la perte au feu).

L'échantillon 4919, composé des nodules de 1 à 2 cm extraits en laboratoire de l'échantillon de schiste (4917), a une teneur en phosphate assez basse (10-15%), une teneur en  $CaO$  faible et une forte teneur en  $SiO_2$ . L'étude minéralogique a montré que ces nodules renferment une forte proportion de quartz, des amas cryptocristallins de phosphate du type apatite (tableau en annexe), des phyllosilicates et des cavités remplies de phosphate de fer. Une partie seulement du phosphate se trouve donc sous forme d'apatite.

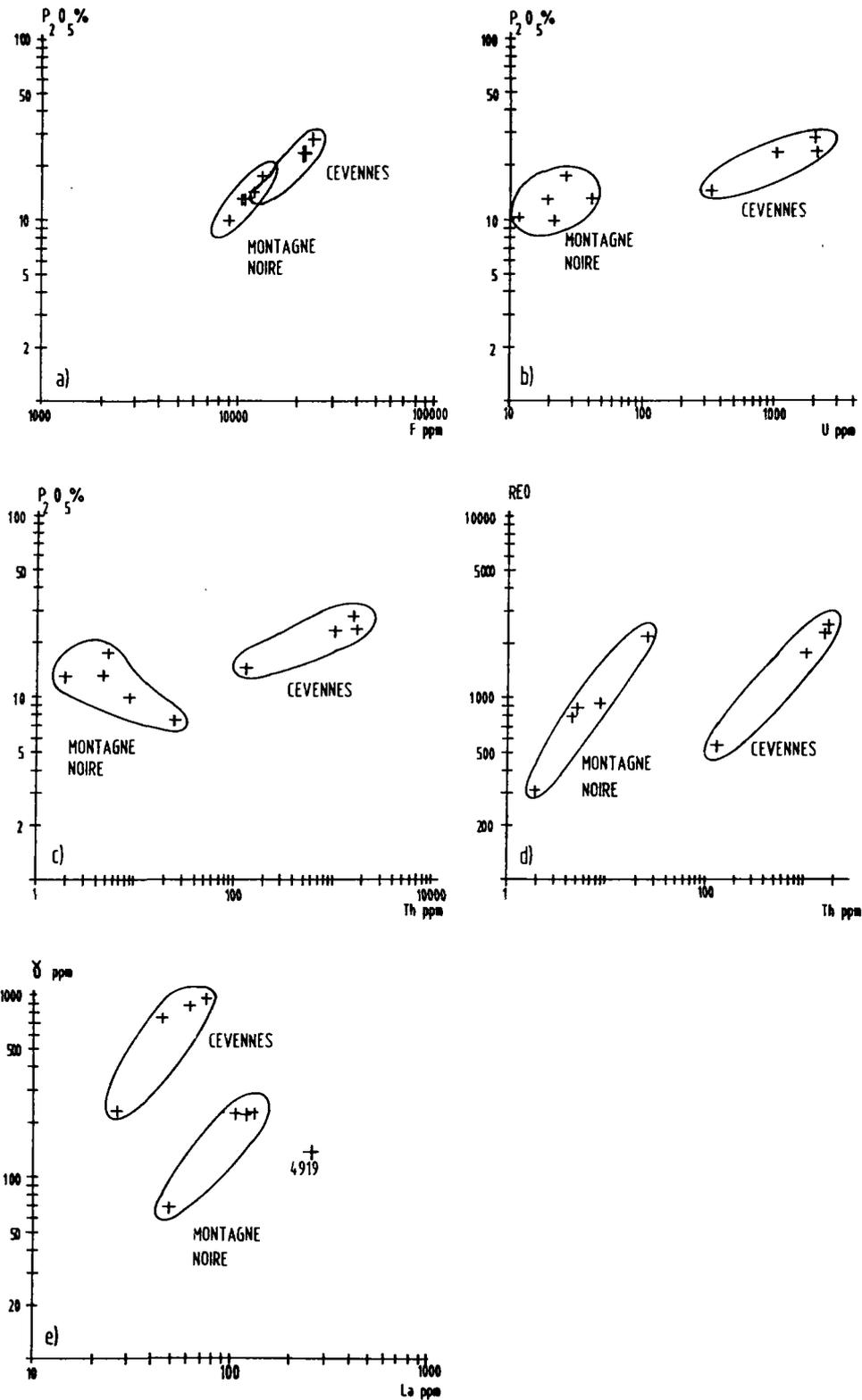


Fig. 4 - Phosphates des Cévennes et de la Montagne-Noire. Relations géochimiques entre  $P_2O_5$  et F (a),  $P_2O_5$  et U (b),  $P_2O_5$  et Th (c), REO (total d'oxyde de terres rares) et Th (d) et La et Y (e).

### 3.3. TENEURS EN URANIUM, THORIUM ET TERRES RARES DES HORIZONS PHOSPHATES

Les variables uranium et thorium diffèrent complètement d'un site à l'autre. Dans les phosphorites de Montagne Noire, les teneurs en uranium sont comprises entre 20 et 42 ppm, sauf pour l'échantillon 4918, qui ne contient que 11 ppm. Ces teneurs sont basses, même si l'on considère que la proportion de phosphates dans l'échantillon est faible : Altschuller (1980) propose 120 ppm comme teneur moyenne des phosphorites, 30 ppm étant considéré comme une valeur faible.

Au contraire, les phosphates cévenols sont exceptionnellement riches en uranium (350 à 2160 ppm). Dans leur synthèse sur l'uranium dans les phosphorites, Gavshin *et al.* (1974) signalent des valeurs analogues dans des phosphorites de dépressions intramontagneuses ; Love (1964), quant à lui, mentionne ces valeurs dans des formations de phosphorites lacustres.

La corrélation  $P_2O_5/U$  est propre à chacun des deux sites (fig. 4b) et dépend probablement de la composition des solutions initiales (Lucas *et al.*, 1985) ; pour la Montagne-Noire, les valeurs sont compatibles avec le milieu marin ouvert, par contre les phosphates cévenols seraient issus de milieux plus confinés, probablement d'origine non marine (Gavshin *et al.*, 1974).

Les teneurs en thorium varient également d'un site à l'autre (annexe) ; elles sont de 1000 à 2000 ppm dans les phosphorites des Cévennes et seulement de 2 à 9 ppm dans les phosphates de Montagne-Noire, teneurs comparables aux nodules d'apatite du plateau continental péruvien (Piper *et al.*, 1988), de phosphates tunisiens (Tlig *et al.*, 1987), ou du bassin sénégalais (Bonnot-Courtois, Flicoteaux, 1989).

Dans le premier cas, les enrichissements en U et Th sont connexes, avec des rapports U/Th compris entre 1 et 2,6, alors que ce même rapport oscille entre 2,5 et 10 pour la Montagne-Noire où, en fait, la teneur en Th n'est pas corrélée avec celle en phosphate (fig. 4c). D'autre part, l'échantillon 4919 fait encore exception avec un rapport U/Th = 0,43.

Les teneurs en thorium sont étroitement corrélées avec celles en oxydes de terres rares (fig. 4d), mais les phosphates des Cévennes se démarquent de ceux de la Montagne-Noire par des valeurs du rapport REO/Th assez basses (1 à 4) contre 80 à 180 dans l'autre cas.

Les spectres de terres rares sont très homogènes pour les échantillons cévenols (fig. 5a) et sont tous caractérisés par un très fort enrichissement en terres rares lourdes que l'on retrouve d'ailleurs dans le diagramme Y en fonction de La (fig. 4e).

En fait, l'enrichissement en terres rares lourdes n'est pas homogène, ce qui se matérialise par une inflexion du spectre de terres rares au niveau du dysprosium. Ce type d'enrichissement, avec cette forme de spectre de terres rares, a déjà été observé (Mc Lennan *et Taylor*, 1979 ; Fryer *et Taylor*, 1984) en association avec des minéralisations uranifères à Pine Creek, en Australie ; comme pour les Cévennes, la relation terres rares-uranium est clairement établie et les auteurs arguent de celle-ci pour expliquer la forme du spectre de terres rares qui serait due au transport de ces éléments sous forme de carbonates complexes du type  $REE [(CO_3)_3]^{3-}$ .

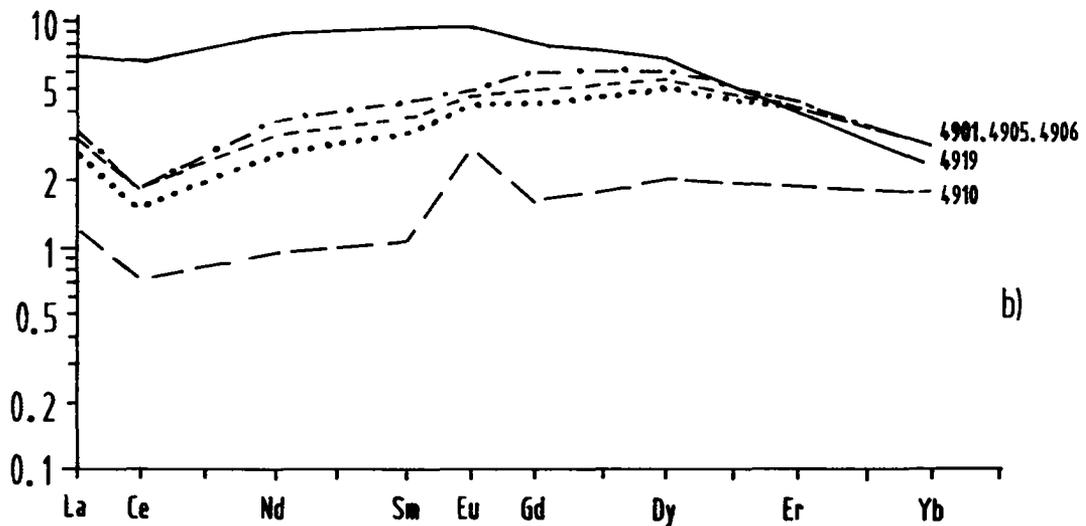
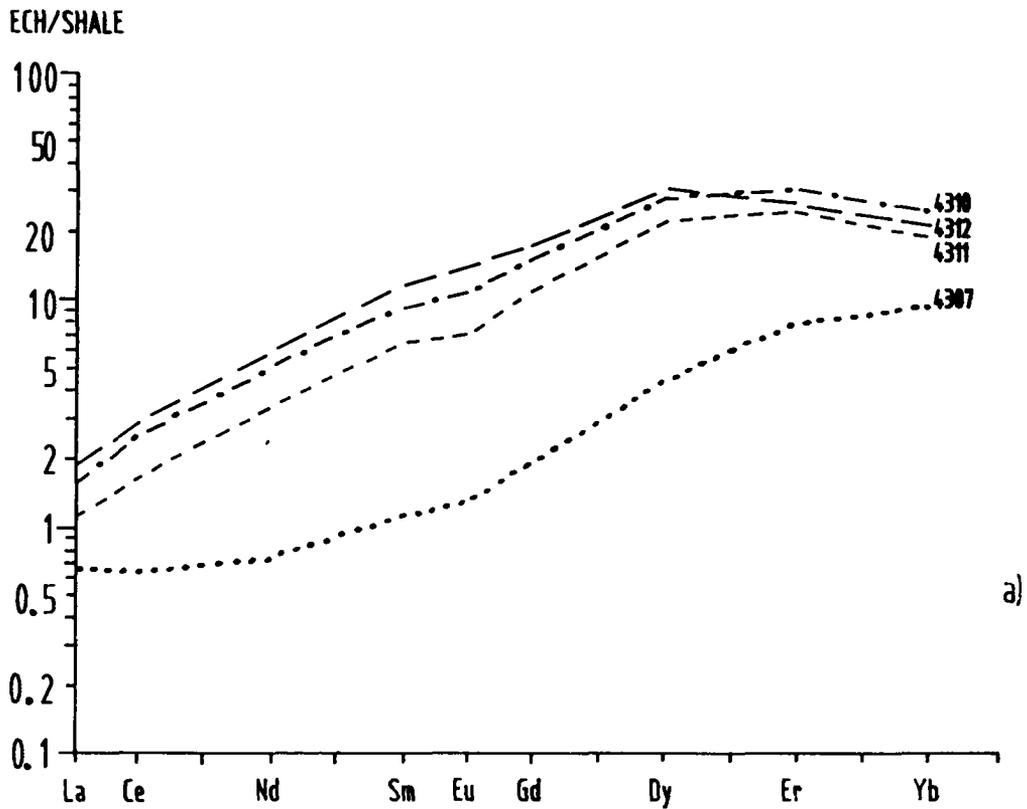


Fig. 5 - Spectres de terres rares normalisés aux shales (Piper, 1974) des horizons phosphatés du Vigan (a) et de la Montagne-Noire (b).

Les spectres des horizons phosphatés de la Montagne-Noire (fig. 5b) diffèrent des précédents, d'une manière générale, en ne montrant pas d'enrichissement très marqué des terres rares lourdes. Parmi ceux-ci, les spectres des échantillons de la série de Peux (4901, 4905, 4906) sont, malgré des lieux de prélèvement distants les uns des autres et une présentation un peu différente de celle des nodules, tout à fait similaires. Ces spectres se caractérisent par une légère anomalie négative du cérium et un enrichissement modéré des terres rares lourdes, tout au moins celles comprises entre le néodyme et le dysprosium. L'anomalie négative en cérium est bien connue dans les horizons phosphatés (Bonnot-Courtois, Flicoteaux, 1989 ; Mc. Arthur, Walsh, 1984) et, s'agissant de phosphates assez récents, les auteurs établissent un lien direct entre celle-ci et celle observée dans l'eau de mer actuelle. La distribution des terres rares lourdes présente souvent une analogie moindre avec celle de l'eau de mer, mais par ailleurs, il est difficile d'imaginer que l'eau de mer ait toujours eu la même distribution de terres rares, sachant que même à l'heure actuelle, elle diffère d'un océan à l'autre (Baar et al. 1985).

Pour ce qui concerne les échantillons de la Montagne-Noire, qui sont d'âge cambrien, faire une analogie avec les observations des océans actuels n'est pas exempt de risque ; par contre, la distribution des terres rares des granules phosphatés peut peut-être aider à cerner certains paramètres des mers de cette époque. Ainsi l'anomalie du cérium est largement utilisée pour l'interprétation des conditions oxydantes du milieu de dépôt. Cette anomalie peut être suivie en utilisant la formule :

$$Ce_{anom} = \text{Log} \left[ 3 Ce_N / (2 La_N + Nd_N) \right]$$

dans laquelle les valeurs de normalisation sont les teneurs des shales nord-américains (Haskin et Haskin, 1966) afin de pouvoir établir des comparaisons avec les travaux de Wright et al. (1987). Ainsi les valeurs négatives obtenues pour l'anomalie du cérium (-0,69 à - 0,57) tendent à démontrer, pour la série de Peux, un milieu de formation oxydant. Ceci est en désaccord avec les résultats de Wright et al. (1987), qui à partir d'observations en Chine et aux USA concluaient au caractère réducteur général des océans cambriens ( $Ce_{anom} = 0$ ).

L'échantillon 4910 pose d'ailleurs un réel problème d'interprétation, puisque sur le même échantillon on a indication, d'une part d'un milieu oxydant, qui se traduit par l'anomalie négative du cérium (- 0,52) et, d'autre part, de milieu réducteur marqué par l'anomalie positive en europium (Mc Arthur, Walsh, 1984).

Il y a toutefois un danger à généraliser des observations ne tenant compte que d'un paramètre. En effet, la série de Peux contient des niveaux de shales noirs qui évoquent plutôt un milieu réducteur; on trouve ainsi un de ces niveaux, localisé à 2 m sous l'horizon phosphaté 4901, qui contient 6,6% de carbone organique total (Ech. 4904, annexe). Il faut donc soit admettre des variations assez rapides des conditions de dépôt et/ou diagenèse, soit atténuer la signification de l'anomalie du cérium.

L'échantillon 4919 présente un spectre radicalement différent des autres échantillons, celui-ci s'apparentant plutôt à un spectre de "type shale", enrichi 8 fois ; Mc Arthur et Walsh (1984) signalent ce type de spectre et l'interprètent comme indicateur de milieux réducteurs. Dans notre cas, cette interprétation est supportée par les teneurs en carbone organique total élevées (1,24%) de l'échantillon hôte de ces nodules (4917).

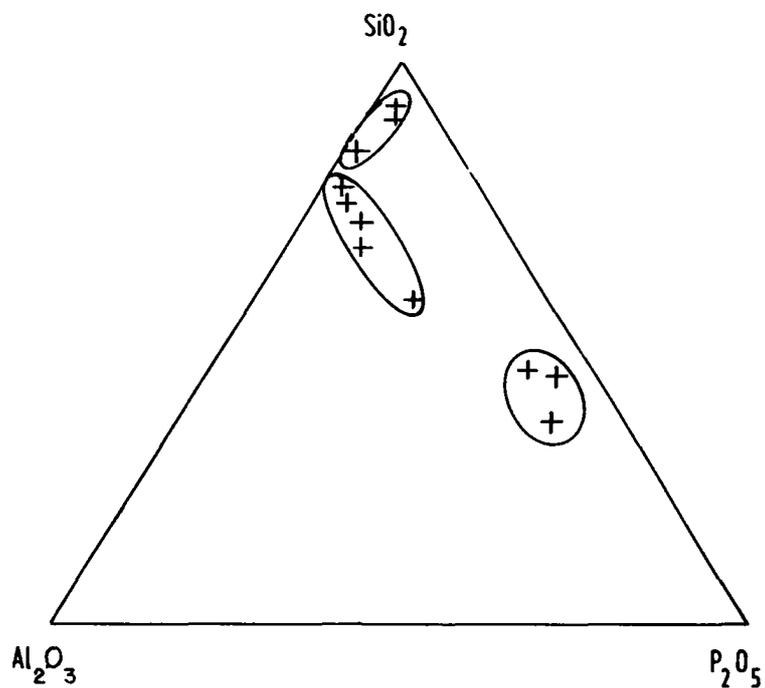
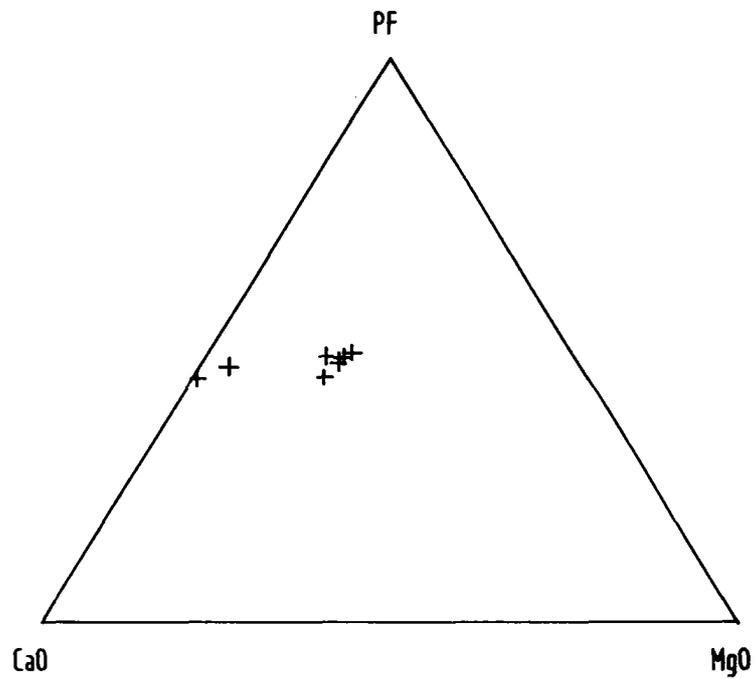


Fig. 6 - Diagrammes ternaires des carbonates : a) perte au feu (PF), CaO-MgO, faisant apparaître l'homogénéité des compositions des dolomies, b) SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : pour faire apparaître la phase non carbonatée des carbonates.

## 4. LES HORIZONS CARBONATES

### 4.1. ELEMENTS MAJEURS

Dans la région du Vigan, la série carbonatée est bien développée en regard des faciès détritiques fins ou volcanodétritiques. Elle est formée de plusieurs niveaux de dolomie homogène (fig. 6a) (MgO = 16 à 20%) dans lesquels la phase non carbonatée est représentée (fig. 6) par de la silice en veinules (4308-4902-4916), des phases argileuses (4303-4314) à rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  sensiblement constant et des phosphates ; ceux-ci sont surtout développés dans les dolomies du Vigan et en particulier celles de Bréau et Vézenobres où les teneurs en  $\text{P}_2\text{O}_5$  atteignent 5%.

En Montagne-Noire, les carbonates sont représentés par des calcaires et dolomies (fig. 6).

### 4.2. LES TENEURS EN URANIUM, THORIUM ET TERRES RARES DANS LES CARBONATES

Le contenu en terres rares des horizons carbonatés (fig. 7) est plutôt élevé par rapport à des carbonates plus récents (Tlig, 1987) : ceci est particulièrement vrai pour l'échantillon 4309 dont le contenu est plus de deux fois celui des shales. En fait, il semble que le contenu soit directement lié à la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  (fig. 8a), avec, comme on l'a noté précédemment, une séparation entre les populations de carbonates cévenols et de Montagne-Noire ; bien que les échantillons des Cévennes aient des teneurs en terres rares plus élevées, leur teneur par unité de phosphate est plus faible.

Les spectres de terres rares des carbonates sont caractérisés pour tous les échantillons par un enrichissement en terres rares lourdes ; ceux des échantillons du Vigan (fig. 7a, b) ont exactement la forme de ceux observés dans les phosphates de Vézenobres (fig. 5a) et on peut donc en conclure que la distribution en terres rares des dolomies est conditionnée par les apatites qu'elles contiennent.

En Montagne-Noire (fig. 7c), on observe toujours un fort enrichissement en terres rares lourdes, mais il n'y a cependant pas identité de spectres avec les échantillons du Vigan. Par ailleurs, ces spectres ne portent pas la marque du milieu marin telle qu'on a pu la déceler dans les phosphates de cette série et ne présentent aucune analogie avec ces mêmes phosphates.

Avec les variables uranium et thorium (fig. 8b, 8c), les carbonates des Cévennes s'opposent, par leur teneur élevée en ces éléments, aux carbonates de la Montagne-Noire. Enfin, le baryum (fig. 8d) est toujours à des teneurs inférieures à 20 ppm dans le premier cas, sans relation apparente avec la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , alors qu'il croît avec cet élément dans les carbonates de Montagne-Noire atteignant des valeurs de 250 ppm.

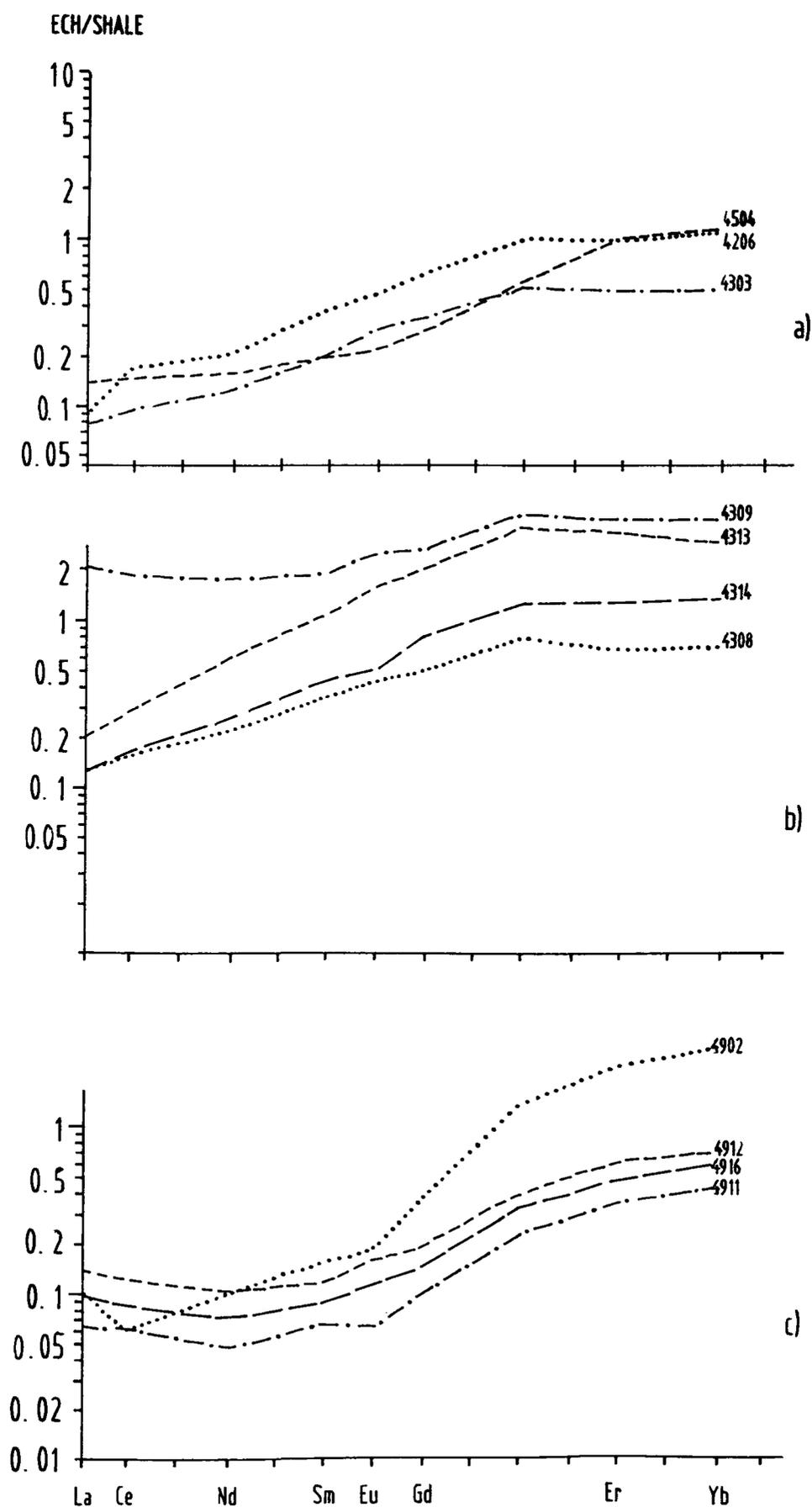


Fig. 7 - Spectres de terres rares des niveaux carbonatés du Vigan (a : Bréan et Aulas ; b : Vézenobres) et de Montagne-Noire (c : 4902 et 4912 sont des calcaires).

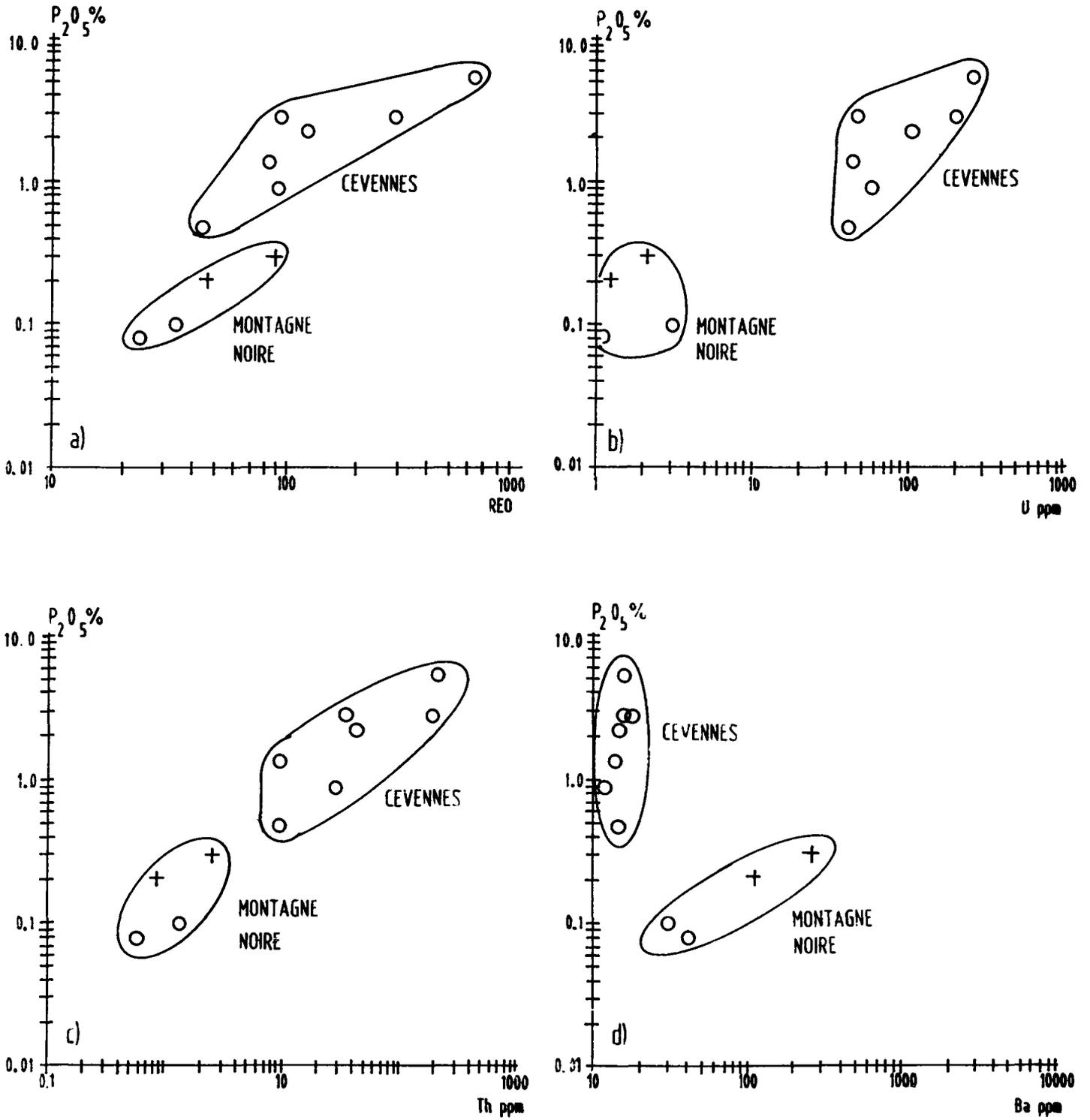


Fig. 8 - Diagrammes binaires des carbonates (O : dolomie + calcaire) de la Montagne-Noire et des Cévennes.

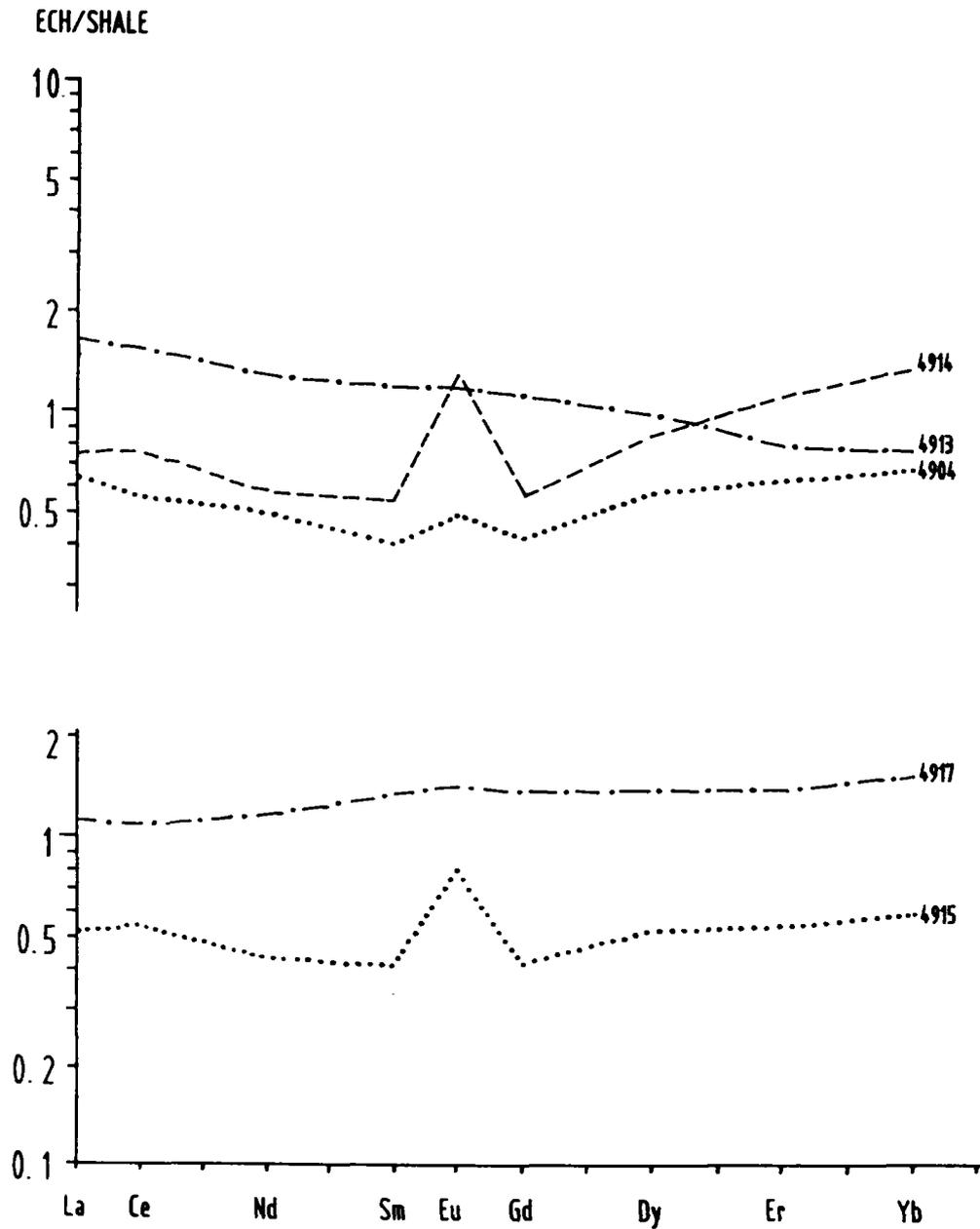


Fig. 9 - Spectres de terres rares des schistes de la Montagne-Noire.

## 5. LES HORIZONS DE SHALES NOIRS

### 5.1. ELEMENTS MAJEURS

Dans tous les échantillons de shales, étudiés uniquement en Montagne-Noire, la phase carbonatée est à peu près absente, aucun d'entre eux n'excédant 1% de CaO. La fraction phosphatée est également faible, puisque les teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> avoisinent 0,2% ; seuls les schistes noirs d'Avignou (éch. n°4917), qui contiennent les nodules silicophosphatés 4919, présentent des teneurs plus élevées (1,36%).

### 5.2. ELEMENTS EN TRACES ET TERRES RARES

Tous les shales noirs cambriens du versant nord de la Montagne-Noire se caractérisent par des teneurs assez élevées en baryum (de 1100 à plus de 3500 ppm), en bore (100 à 190 ppm) et vanadium (130 à 490 ppm) ; les teneurs pour ce dernier élément sont à mettre en parallèle avec les teneurs parfois élevées en carbone organique total (voir annexe).

Vis-à-vis des terres rares (fig. 9), ces shales se partagent en deux groupes : les échantillons 4917 et 4913 montrent des spectres réguliers ; l'échantillon 4917 présente un spectre très peu différent des shales de référence (Piper, 1974) alors que l'échantillon 4913 est très régulièrement enrichi en terres rares légères. L'autre groupe d'échantillons (4904, 4913, 4915) présente deux particularités : leur contenu global en terres rares est faible (0,5 à 0,8 fois la moyenne des shales) et tous présentent une anomalie positive en europium. Celle-ci est généralement interprétée comme l'indication d'un milieu réducteur, et les teneurs en carbone relevées dans ces échantillons (4904 = 6,6% et 4014 = 4,95%) plaident en faveur d'une telle interprétation.

Il faut cependant rapprocher ces anomalies en europium des teneurs en baryum relevées dans ces schistes ; ces teneurs qui dépassent 3500 ppm, indiquent probablement la présence de barytine ; lors d'études précédentes (Laval et Dromart, 1990), des analyses de nodules de barytine de l'Albien ont montré des anomalies positives en europium importantes ( $Eu_N/Eu^*_{N=10}$ ). On peut donc penser (sous réserve de contrôles en cours) que la capture préférentielle de l'europium est une caractéristique de la barytine et que la présence de ce minéral dans les shales de la Montagne-Noire est à l'origine de l'anomalie observée.

Une autre explication enfin peut être avancée pour expliquer cette anomalie positive en europium. Celle-ci a été observée dans des constructions carbonatées interprétées comme des cheminées hydrothermales fossiles (Laval et Dromart, 1990) dans l'amas sulfuré de Mount Isa (Taylor et Mc Lennan, 1988), dans des carbonates stratiformes et veines de quartz d'origine hydrothermale (Kerrick et Fryer, 1978), dans des séquences volcanogéniques archéennes (Fryer et al., 1978) et enfin dans des sources hydrothermales (Michard, 1989) ; elle pourrait donc, et ceci n'est pas incompatible avec les teneurs élevées en baryum, être l'expression d'une influence hydrothermale.

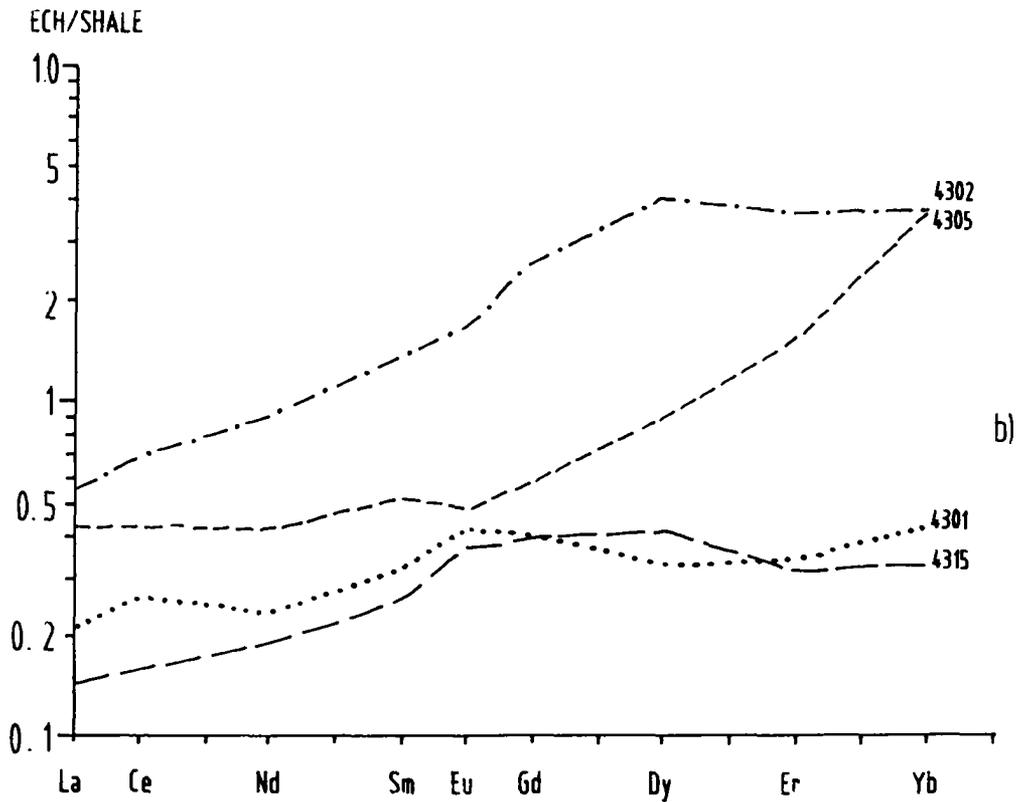
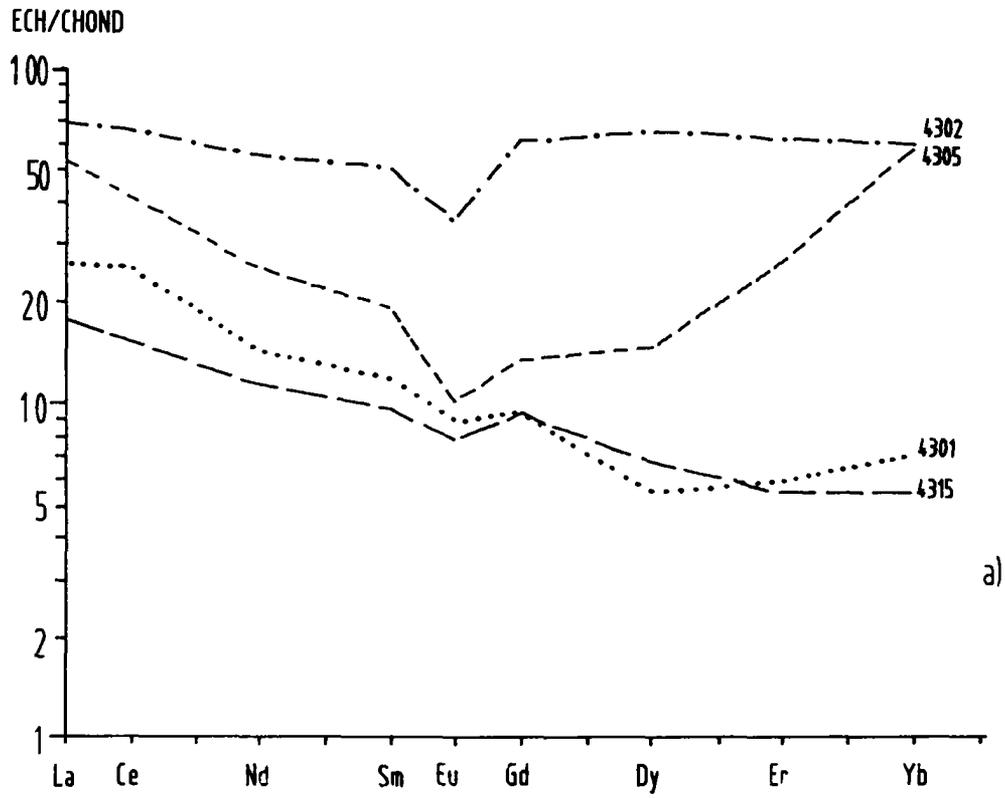


Fig. 10- Les volcanites de la région du Vigan.  
a) normalisation aux chondrites.  
b) normalisation aux shales.

## 6. LES ROCHES VOLCANIQUES ET FACIES TUFACES

### 6.1. LES FACIES DES CEVENNES

Les quatre échantillons prélevés (4301, 4302, 4305 et 4315) présentent une structure microlitique avec des albites en lattes, sauf l'échantillon 4315 qui s'apparente plutôt à un tuf basique. Dans tous les cas, les indices minéralogiques d'hydrothermalisme sont nombreux : développement de mica blanc et chlorite magnésienne dans le tuf 4315, albitisation tardive, développement de sulfures et micas blancs dans les autres cas. L'apatite est omniprésente, parfois même très abondante (4305).

Les éléments majeurs traduisent ces observations ; les teneurs en  $\text{Na}_2\text{O}$  varient de 5 à 10% ; les pertes au feu sont élevées ; les teneurs en phosphate varient de 0,50 à 8,50%. Le tuf basique (4315) diffère beaucoup des autres échantillons, par sa teneur élevée en  $\text{MgO}$  (15,2%), en  $\text{K}_2\text{O}$  (3,05%) et son absence de sodium.

Si l'on excepte ce dernier faciès, les teneurs en uranium des albitites sont très élevées (70 à 330 ppm), avec des rapports U/Th forts (de 3,6 à 27). Les spectres de terres rares, normalisés aux chondrites, montrent des fractionnements très faibles, une faible anomalie négative de l'euporium, comme ceci est observé fréquemment dans les faciès peu évolués (fig. 10a). Les deux faciès, pour lesquels l'enrichissement en terres rares lourdes est le plus fort (4302 et 4305), sont aussi ceux qui contiennent le plus de phosphates, respectivement 3,35 % et 8,50%.

Si l'on normalise les spectres non plus aux chondrites mais aux shales (fig. 10b), tous présentent un rapport  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  qui indique un enrichissement en terres rares lourdes analogue à celui observé dans les phosphates (fig. 5a) ; ceci ne permet cependant pas de conclure sur l'origine des teneurs élevées en uranium et en terres rares observées dans tous les faciès des Cévennes.

### 6.2. LES FACIES DE LA MONTAGNE-NOIRE

Trois échantillons ont été prélevés, dont deux (4907 et 4908) montrent clairement un faciès volcanique, le dernier (4909) ayant plutôt une allure tufacée. L'altération hydrothermale, avec développement de chlorite et séricite, est importante dans les échantillons 4907 et 4908 ; la carbonatation affecte également ces faciès mais la teneur élevée en  $\text{CaO}$  de l'échantillon 4909 (23,77%) est due au ciment calcaire des éléments volcanoclastiques.

Comme précédemment, ce volcanisme est à tendance sodique et les faciès s'apparentent aux spilites-kératophyres (Prian, 1980 ; Pin, 1981).

Les spectres des terres rares normalisées aux chondrites (fig. 11a) indiquent un enrichissement faible (10 à 20 fois les chondrites) sans fractionnement important, indicateur de magmatisme peu évolué. La volcanite de Ouyre-Haute (4908), présente comme on l'a déjà noté pour certains schistes (fig. 9) ou certains phosphates une anomalie positive en europium. S'agissant d'une roche d'origine magmatique, on peut voir dans cette anomalie l'expression d'une phase plagioclasique

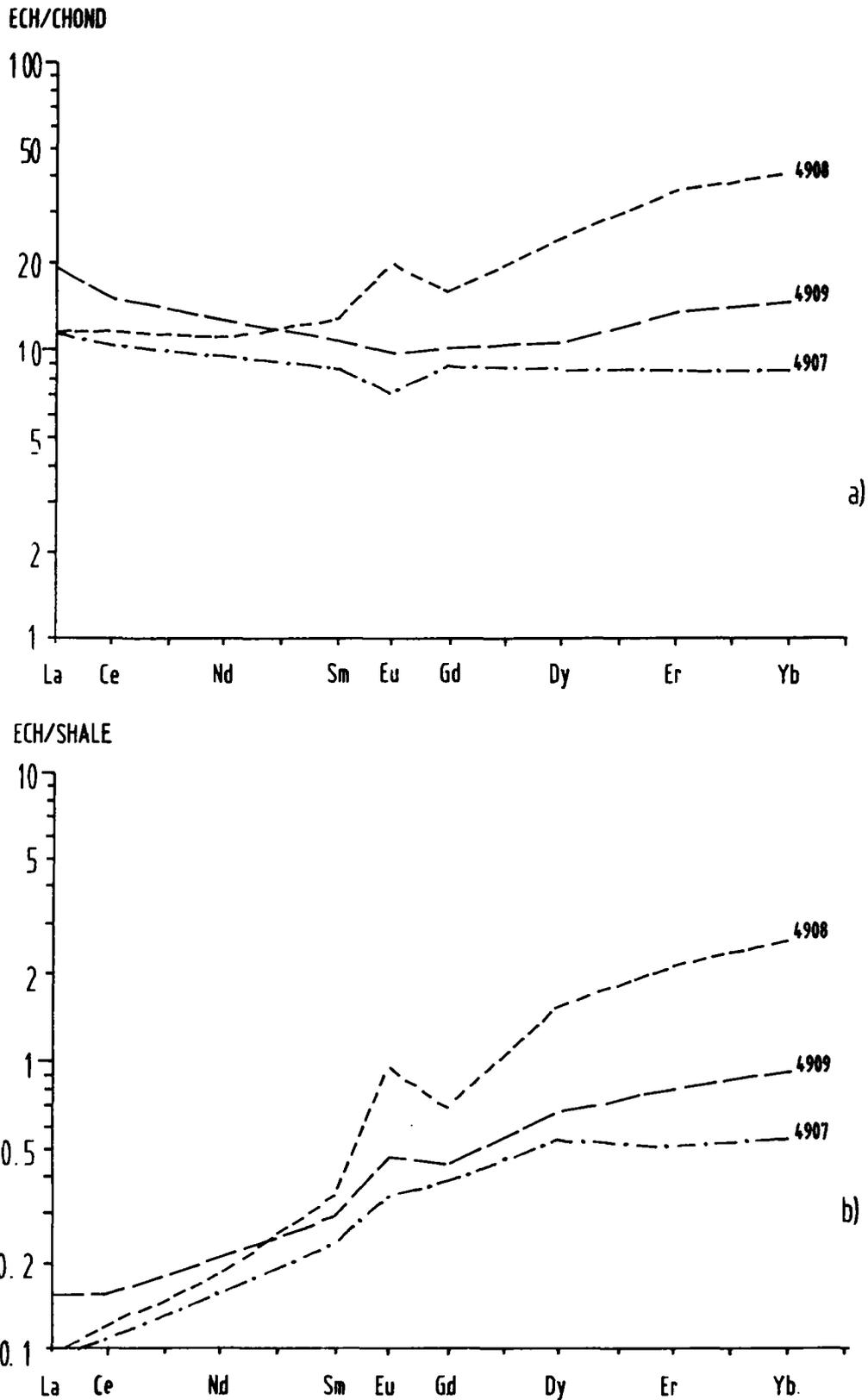


Fig. 11- Les volcanites du versant nord de la Montagne-Noire.  
 a) normalisation aux chondrites.  
 b) normalisation aux shales.

cumulative, mais par ailleurs, il est difficile de ne pas rapprocher cet échantillon d'une part des niveaux phosphatés alternant avec cette lave (4910), d'autre part de certains niveaux de schistes (4914-4915) qui tous présentent cette anomalie, mais qui tous ont aussi des teneurs anormales en baryum. Cette anomalie est soit liée à la présence de barytine dans tous les cas évoqués, sans qu'il y ait un lien génétique entre les divers faciès, soit le baryum et l'anomalie positive en europium sont la signature d'un même phénomène, en relation avec le volcanisme.



## CONCLUSION

Au plan économique, les horizons phosphatés du Vigan présentent un intérêt limité en raison essentiellement des teneurs en terres rares trop basses (0,2%), malgré une distribution relative de celles-ci intéressantes due à l'enrichissement particulièrement élevé en terres rares lourdes.

Sur un plan plus général, cette étude apporte quelques résultats intéressants, mais aussi de nombreuses interrogations. Les deux séries étudiées comportent des niveaux phosphatés, dont la morphologie et la position stratigraphique sont différentes : niveaux peu épais, mais assez continus, du Cambrien inférieur pélitique et carbonaté (K2a) et moyen (K3), en Montagne-Noire ; niveaux puissants, mais de faible extension, des alternances schistocalcaires de la base du Cambrien inférieur dolomitique (K2a), au Vigan. Les éléments phosphatés sont différents : il s'agit dans le premier cas de phosphoclastes et nodules centimétriques de formes diverses (Prian, 1980), alors que dans le second cas, les phosphates constituent des masses parfois bréchiques qui évoquent un gel, compatible avec une précipitation chimique secondaire post-sédimentation et remplacement des rhomboèdres de dolomite par le phosphate (phénomène d'épigenèse).

La géochimie de ces horizons diffère d'une région à l'autre : les phosphates du Vigan sont exceptionnellement enrichis en uranium ce qui évoque un milieu confiné probablement non marin, alors que les nodules de la Montagne Noire ont des teneurs normales pour des phosphates marins. L'enrichissement en terres rares est également exceptionnel dans le premier cas avec un spectre peu commun, alors que les phosphates de Montagne-Noire montrent une anomalie négative du cérium qui peut être interprétée comme une signature marine. Autant il est donc raisonnable de penser que les niveaux phosphatés de la Montagne-Noire sont d'origine marine directe avec remaniements de débris de hard-ground, autant on peut en douter dans l'autre cas ; les phosphates cévenols, qui ne présentent pas de caractères marins, pourraient être en relation avec un hydrothermalisme lié au volcanisme régional.

Les carbonates de la région du Vigan sont des dolomies ; leur distribution en terres rares est directement liée à la phase phosphatée qu'elles contiennent, ce qui se marque à la fois par une corrélation des teneurs globales en terres rares avec la teneur en  $P_2O_5$ , et par des spectres de distribution analogues aux horizons phosphatés de Vézenobres. Par conséquent, on peut se demander, si les horizons phosphatés de la région du Vigan, ne sont pas en fait des concentrations résiduelles produites par dissolution des dolomies dans des paléokarsts. Ceci pourrait expliquer la formation des horizons phosphatés du Vigan par accumulation résiduelle, mais n'expliquerait pas l'origine du phosphate et ses teneurs très élevées en uranium et terres rares. L'analyse des volcanites sodiques de la région, contemporaines des dolomies, n'amène pas d'arguments probants quant à la filiation de ces éléments, car les teneurs anormalement élevées qu'on y observe peuvent très bien être en relation avec une phosphatisation secondaire ; l'hydrothermalisme invoqué plus haut ne constitue donc qu'une hypothèse de travail.

## BIBLIOGRAPHIE

ALBOUY L. (1975) - Etude géologique et métallogénique de la région de Vabre, Ferrières et Brassac (Tarn) - Thèse 3ème cycle, Toulouse.

ALTSCHULLER Z.S. (1980)- The geochemistry of trace elements in marine phosphorites. Part I. Characteristic abundances and enrichment. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spectr. Publ., 29, p. 19-30.

BAAR M.J.W. (de), BACON M.P., BREWER P.G. (1985) - Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans. Geochim. Cosmochim. Acta G.B., vol. 49, p. 1943-1959.

BONNOT-COURTOIS C. (1981) - Géochimie des terres rares dans les principaux milieux de formation et de sédimentation des argiles. Thèse Doct. Sci., Paris-Orsay, 217 p.

BONNOT-COURTOIS C., FLICOTEAUX R. (1989) - Distribution of rare-earth and some trace element in Tertiary phosphorites from the Senegal Basin and their weathering products. Chem. Geol. (75), p. 311-328.

FRYER B.J., TAYLOR R.P. (1984) - Sm-Nd direct dating of the Collins Bay hydrothermal uranium deposit, Saskatchewan - Geology, vol. 12, p. 479-482.

FRYER B.J., FYFE W.S., KERRICH R. (1979) - Archean volcanogenic oceans - Chemical geology, vol. 4, p. 25-33.

GAVSHIN V.M., BOBROU V.A., ZORKINA L.S. (1974) - Quantitative relations between uranium and phosphorus in phosphorites and phosphatic rocks. Lithol. Mine. Res. 9, n° 6, p. 740-746.

GUERANGE-LOZE J. (1986) - Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations. Documents BRGM n° 135.

HASKIN M.A., HASKIN L.A. (1966) - Rare earth in european shales : a redetermination. Science, 154, p. 507-509.

KERRICH R., FRYER B.J. (1978) - Archean precious metal hydrothermal systems, Dome Mine, Abitibi, Greenstone Belt. II REE and oxygen isotope relations. Can. J. Earth Sci., vol. 16, p. 440-458.

LAVAL M., DROMART G. (1990) - Les terres rares dans les shales noirs mésozoïques. Note DAM/DEX n° 1756, 57 p., 20 fig.

LIU Y.C., MIAH M.R., SCHMITT R.A. (1988) - Cerium A chemical tracer for paleo-oceanic redox conditions. Geochim. Cosmochim. Acta, G.B., vol. 52, p. 1361-1371.

LOVE J.P. (1964) - Uraniferous phosphatic lake beds of Eocene age in intermontane basins of Wyoming and Utah. U.S. Geol. Surv. Prof. paper 474.E.

LUCAS J., NGUYEN T.C., PREVOT L. (1985) - Experimental introduction of uranium into the lattice Terra Cognita 5, p. 283.

MC ARTHUR J., WALSH (1984) - Rare-earth geochemistry of phosphorites. Chem. Geol. 47, p. 191-220.

- MC LENNAN S.M., TAYLOR S.R. (1979) - Rare earth element mobility associated with uranium mineralisation. *Nature* vol. 282, p. 247-250.
- MICHARD A. (1989) - Rare earth element systematy in hydrothermal fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, GB, vol. 53, p. 745-750.
- ORGEVAL J.J., CAPUS G. (1978) - Existence d'un horizon phosphaté uranifère et thorifère à la base des formations carbonatées cambriennes de la région du Vigan (Gard, France) ; son remaniement karstique. *C.R. Som. Soc. Géol. Fr.*, fasc. 3, p. 115-117.
- PIN C. (1989) - Essai sur la géochronologie et l'évolution géodynamique de la chaîne hercynienne d'Europe. Thèse université Clermont-Ferrand.
- PIPER D.Z. (1974) - Rare earth elements in the sedimentary cycle : A summary. *Chemical geology*, 14, p. 285-304.
- PIPER D.Z., BAEDECKER P.A., CROCK J.G., BURNETT W.C., LOEBNER B.J. (1988) - Rare earth elements in the phosphatic-enriched sediment of the Peru shelf. *Marine geology.*, 80, p. 269-285.
- PRIAN J.P. (1980)- Les phosphorites du versant septentrional de la Montagne-Noire au sud du bassin permien de Camarès (Aveyron). Thèse Univ. Paris VI - 2 vol., 407 p.
- SLANSKY M. (1980) - Geologie des phosphates sédimentaires. Mém. BRGM, n° 114, p. 92.
- TAYLOR R.S., Mc LENNAM M.S. (1988) - The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry in handbook on the Physics and Chemistry of rare earths vol. 11, Gschneidner, K.A. Jr. and Eyring L. (Ed.) Elsevier.
- TLIG S. (1987) - The Sr and Rare earth element (REE) behaviour during diagenesis of limestones in various environmental conditions in the practical applications of trace elements and isotopes to environmental biogeochemistry and mineral resources evaluation. Hurst, R.W., Davis T.E. and Ahgustithis S.J. Editors. *Theophrastus publications S.A.*, Athen. Greece.
- TLIG S., SASSI A., BELAYOUNI H., MICHEL D. (1987) - Distribution de l'uranium, du thorium du zirconium, du Hafnium et des terres rares (TR) dans des grains de phosphates sédimentaires. *Chemical geology*, 62, p. 209-221.
- WRIGHT J., SCHRADER H., HOLSER W.T. (1987) - Paleoredox viariations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, G.B., vol. 51, p. 631-644.

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

- Fig. 1 - Localisation des deux zones étudiées dans le sud du Massif central français : le Vigan (Cévennes) et le versant nord de la Montagne-Noire.
- Fig. 2 - Secteur du Vigan : localités échantillonnées.
- Fig. 3 - Carte géologique simplifiée de l'écaille du Merdellou (d'après Prian, 1980) : localités échantillonnées.
- Fig. 4 - Phosphates des Cévennes et de la Montagne-Noire. Relations géochimiques entre  $P_2O_5$  et F (a),  $P_2O_5$  et U (b),  $P_2O_5$  et Th (c), REO (total d'oxyde de terres rares) et Th (d) et La et Y (e).
- Fig. 5 - Spectres de terres rares normalisés aux shales (Piper, 1974) des horizons phosphatés du Vigan (a) et de la Montagne-Noire (b).
- Fig. 6 - Diagrammes ternaires des carbonates : a) perte au feu (PF), CaO-MgO, faisant apparaître l'homogénéité des compositions des dolomies, b)  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ - $P_2O_5$  : pour faire apparaître la phase non carbonatée des carbonates.
- Fig. 7 - Spectres de terres rares des niveaux carbonatés du Vigan (a : Bréan et Aulas ; b : Vézenobres) et de Montagne-Noire (c : 4902 et 4912 sont des calcaires).
- Fig. 8 - Diagrammes binaires des carbonates (O : dolomie + calcaire) de la Montagne-Noire et des Cévennes.
- Fig. 9 - Spectres de terres rares des schistes de la Montagne-Noire.
- Fig. 10- Les volcanites de la région du Vigan.  
a) normalisation aux chondrites.  
b) normalisation aux shales.
- Fig. 11- Les volcanites du versant nord de la Montagne-Noire.  
a) normalisation aux chondrites.  
b) normalisation aux shales.
- Tableau : Analyse à la microsonde des apatites du Viganais.
- Annexe : Résultats analytiques sur roche totale.

n°échant.	4305			4312		4919	
	Faciès	Grosse	Pélites en amas	Apatite	Plage sombre	Apatite	Gel isotrope
CaO	52,75	53,08	53,44	51,09	39,39	54,16	40,36
SiO	0,24	0,48	0,28	0,10	0,04	0,19	0,61
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,12	0,03
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,25	0,00
UO <sub>2</sub>	0,05	0,21	0,14	0,42	1,65	0,00	0,00
ThO <sub>2</sub>	0,02	0,00	0,03	0,30	1,03	0,00	0,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	42,26	42,90	43,30	39,96	31,93	43,34	32,78
F	3,39	1,68	1,90	2,68	1,49	0,00	0,00
CL	0,00	0,00	0,00	0,11	0,10	-	-
H <sub>2</sub> O*	0,15	0,98	0,89	0,38	0,61	-	-
Total	98,86	99,33	100,02	95,10	77,29	98,30	74,28

**Tableau 1**  
Composition des apatites (en %)



**A N N E X E**

INDR	4301	4302	4303	4304	4305	4306	4307	4308	4309	4310	4311	4312	4313	4314	4315
SI02	64.50	60.90	2.90	1.90	49.60	10.90	58.40	24.70	5.20	20.40	17.60	27.40	2.45	5.50	41.80
AL2X	18.40	16.30	0.94	0.50	17.50	3.00	4.50	1.25	0.99	3.35	7.45	5.45	0.29	1.85	14.80
FE2X	0.91	1.55	0.93	0.66	2.55	1.45	1.20	1.35	1.25	1.45	3.00	1.55	1.05	1.45	8.75
CAO	0.97	5.70	29.80	31.60	11.50	26.70	19.20	25.00	32.60	37.60	33.90	32.60	31.20	29.70	4.15
MGO	0.20	0.34	19.50	19.40	0.20	16.80	0.38	12.50	16.90	0.55	2.40	1.20	18.70	18.20	15.20
NA2O	10.90	8.05	0.20	0.20	5.15	1.05	0.20	0.20	0.20	0.51	0.28	0.43	0.20	0.20	0.20
K2O	0.40	1.25	0.10	0.05	1.35	0.20	0.61	0.15	0.15	1.35	1.45	1.40	0.05	0.54	3.05
TIO2	1.25	0.51	0.05	0.05	0.71	0.12	0.17	0.07	0.07	0.17	0.36	0.20	0.05	0.10	0.74
MNO	0.05	0.04	0.04	0.07	0.09	0.05	0.03	0.06	0.07	0.02	0.03	0.02	0.08	0.06	0.11
P2O5	0.50	3.35	0.48	2.80	8.50	1.35	14.40	0.89	5.30	27.90	23.20	23.70	2.20	2.20	0.11
PF	1.20	1.30	45.00	43.00	2.50	38.00	2.00	33.60	38.10	4.20	8.20	4.70	42.90	40.80	11.70
TOT	99.28	99.29	99.94	100.23	99.65	99.62	101.09	99.77	100.83	98.00	97.87	98.55	99.77	100.60	100.61
COT															

INDR	4901	4902	4903	4904	4905	4906	4907	4908	4909	4910	4911	4912	4913	4914	4915	4916	4917	4919
SI02	19.39	6.74	34.10	63.96	24.14	20.47	53.71	46.42	29.51	18.06	2.19	2.96	61.61	55.65	59.24	5.28	63.76	68.80
AL2X	4.07	0.46	5.68	12.26	6.80	4.21	18.63	16.61	10.61	3.52	0.55	0.79	19.56	16.89	16.61	0.90	17.72	4.65
FE2X	2.59	2.54	4.11	4.92	4.28	4.70	5.89	8.63	3.04	1.77	0.86	0.35	4.96	3.13	3.39	1.31	2.41	0.94
CAO	38.43	44.75	27.93	0.47	33.48	36.92	1.25	8.39	28.21	41.11	29.76	53.38	0.73	0.37	0.15	23.52	0.83	11.15
MGO	1.22	3.82	1.02	0.89	0.77	1.37	7.98	7.42	0.37	1.23	20.36	0.73	0.75	1.33	0.37	19.66	1.16	0.20
NA2O	0.95	0.20	0.26	1.44	1.21	0.20	5.12	2.75	2.63	0.37	0.20	0.20	0.20	0.22	1.02	0.20	0.20	0.20
K2O	0.54	0.05	1.12	2.64	0.71	0.59	0.56	0.05	0.39	0.75	0.05	0.05	5.74	3.99	3.96	0.06	4.98	0.90
TIO2	0.10	0.05	0.21	0.62	0.23	0.16	0.89	0.83	0.31	0.11	0.05	0.05	0.97	0.79	0.77	0.05	0.91	0.15
MNO	0.03	0.06	0.08	0.02	0.07	0.10	0.09	0.12	0.07	0.07	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02
P2O5	13.16	0.30	0.28	0.18	9.97	17.47	0.08	0.10	0.46	13.09	0.08	0.21	0.24	0.18	0.07	0.10	1.36	10.15
FF	17.78	40.34	24.51	12.73	17.89	12.92	4.93	7.99	23.77	19.36	45.89	41.34	4.86	16.32	13.26	44.07	5.95	3.10
TOT	98.76	99.31	99.30	100.13	99.55	99.31	99.13	99.31	99.37	99.44	100.03	100.08	99.55	99.39	99.36	99.89	99.30	
COT	0.13	0.07		6.60		0.06				0.12			0.15	4.95			1.24	

Eléments majeurs (en %) des échantillons des Cévennes (4301 à 4315) et du versant nord de la Montagne-Noire (4901 à 4919).

TOT: total; COT: carbone organique, total (analyse rock-eval)

INDR	4301	4302	4303	4304	4305	4306	4307	4308	4309	4310	4311	4312	4313	4314	4315
U	70	330	42	48	270	45	350	60	270	2080	1090	2160	210	110	10
TH	10	90	10	36	10	10	135	30	220	1630	1040	1750	200	44	10
UTH	7.00	3.67	4.20	1.33	27.00	4.50	2.59	2.00	1.23	1.28	1.05	1.23	1.05	2.50	1.00
LI	5	5	5	5	5	5	24	5	5	5	5	11	5	5	40
B	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	20	51	5	5	5
MO	6	7	6	6	4	7	1	8	6	1	1	1	7	7	9
PB	12	36	8	9	10	6	28	432	7	148	220	84	48	6	6
ZN	5.00	49.00	5.00	5.00	18.00	5.00	54.00	245.00	24.00	73.00	161.00	101.00	5.00	116.00	53.00
BA	26	92	15	18	56	14	10	12	16	51	22	27	16	15	116
ZR	1294	926	2087	1251	709	872	210	1407	471	280	361	322	523	1039	559
F	600	3600	500	2140	7460	1350	12300	950	4370	23800	21800	21400	1900	1550	220
LA	8.6	22.8	3.3	3.8	17.5	5.8	27.0	5.0	84.2	62.4	45.2	74.8	8.3	5.1	5.8
CE	22.0	57.1	7.9	14.0	35.7	12.2	52.7	13.0	152.2	206.0	136.4	236.0	24.0	13.8	13.2
ND	9.0	34.5	4.8	7.9	16.0	6.0	23.2	8.5	66.1	191.0	127.6	222.0	22.8	10.1	7.2
SM	2.4	10.3	1.5	2.8	3.9	1.5	3.5	2.7	14.4	69.1	48.0	86.1	8.2	3.3	2.0
EU	0.68	2.70	0.47	0.77	0.77	0.36	2.13	0.72	4.10	17.30	11.26	22.10	2.58	0.84	0.60
GD	2.6	16.6	2.2	4.0	3.7	1.8	12.2	3.2	17.3	95.2	69.2	109.0	13.0	5.2	2.5
DY	1.9	22.2	2.9	5.5	5.0	3.1	24.2	4.4	24.0	153.7	120.4	168.4	20.0	7.0	2.3
ER	1.3	13.6	1.9	3.7	5.3	3.3	29.7	2.6	15.4	115.1	92.0	98.0	13.0	4.0	1.2
YB	1.5	13.2	1.3	4.0	12.3	4.2	33.0	2.6	14.8	86.0	66.6	74.2	10.6	4.9	1.2
Y	8.0	121.0	10.4	33.2	46.0	31.0	231.0	34.0	147.0	866.0	740.0	952.0	124.0	48.0	12.4
REO	69.71	380.88	44.60	96.75	173.32	85.06	548.30	93.60	652.73	2263.67	1776.14	2485.31	300.53	125.72	58.41

INDR	4901	4902	4903	4904	4905	4906	4907	4908	4909	4910	4911	4912	4913	4914	4915	4916	4917	4919
U	42	2	4	9	22	27	0	0	3	20	1	1	3	5	4	3	8	
TH	5	3	5	7	9	5	1	2	2	2	1	1	16	10	7	1	14	
UTH	9.02	0.82	0.77	1.24	2.48	5.13	0.28	0.19	2.04	10.09	1.50	1.42	0.22	0.44	0.52	2.25	0.58	
LI	10	10	27	28	32	33	108	67	23	10	10	10	78	65	27	10	43	
B	10	10	55	100	43	10	30	10	14	10	10	10	138	183	147	13	148	
MO	1	1	4	38	1	2	2	1	5	14	1	1	2	14	16	1	10	
PB	24	23	32	45	43	37	2	10	22	23	13	19	9	45	36	5	32	
ZN	148.00	6.00	25.00	35.00	46.00	45.00	50.00	63.00	60.00	53.00	3.00	7.00	28.00	33.00	32.00	2.50	10.00	
BA	717	261	751	2208	492	351	220	3500	217	250	42	114	1134	3500	3500	31	1452	
ZR	12	186	478	168	18	20	525	352	271	73	141	215	221	548	579	116	19	
F	11000	360	690	740	9110	13500	590	270	770	10700	180	380	770	760	810	250	1270	
LA	108.1	4.3	25.0	26.3	133.1	122.4	3.3	3.8	6.4	49.7	2.6	5.6	67.6	30.4	21.1	4.0	46.2	291.0
CE	121.8	5.0	45.0	45.8	148.0	151.2	9.0	10.0	13.0	59.0	5.0	10.0	127.3	63.0	45.0	7.0	90.0	550.0
ND	97.1	3.7	19.0	18.9	136.0	118.4	6.0	7.0	8.0	36.0	1.8	3.9	49.0	21.7	16.5	2.7	44.3	330.5
SM	23.6	1.1	4.3	3.0	32.5	27.7	1.3	2.6	2.2	7.9	0.5	0.9	8.9	4.0	3.1	0.6	10.0	69.4
EU	6.77	0.29	1.16	0.78	7.77	7.41	0.55	1.53	0.75	4.40	0.10	0.25	1.39	2.06	1.28	0.18	2.28	14.80
GD	27.0	2.3	5.1	2.6	37.0	31.0	2.5	4.4	2.8	10.0	0.6	1.2	7.0	3.5	2.6	0.9	8.6	50.0
DY	27.1	7.2	6.8	3.1	32.8	30.0	3.0	8.4	3.7	10.9	1.2	2.2	5.4	4.7	2.9	1.7	7.5	36.0
ER	15.0	6.2	5.8	2.3	16.0	15.1	1.9	7.7	3.0	6.9	1.3	2.2	2.9	4.1	2.0	1.7	5.7	14.6
YB	9.8	10.0	6.5	2.4	9.9	10.0	1.9	9.2	3.3	6.0	1.5	2.4	2.7	4.3	2.1	2.1	5.4	7.8
Y	223.2	32.3	39.6	19.8	225.2	220.3	15.3	37.3	18.4	68.9	5.4	10.1	23.5	19.7	13.5	7.7	38.4	130.0
REO	798.40	89.83	190.90	150.43	938.47	886.17	55.17	111.25	74.18	313.13	24.02	46.56	356.40	189.87	132.45	84.68	309.92	

Eléments traces (en ppm) des échantillons des Cévennes (4301 à 4315) et du versant nord de la Montagne-Noire (4901 à 4919).

UTH: U/Th; REO: total des oxydes de terres rares.