

ROYAUME DE BELGIQUE
—
MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES
—
Administration des Mines - Service géologique de Belgique
13, Rue Jenner - 1040 Bruxelles
—

Recherches sur les indices de minéralisations uranifères dans la région de Visé

par

A. HERBOSCH (*) - S.M. DE WITTE (*) - A. PREAT (*)

Professional Paper 1979|6

N° 162

(*) Laboratoire de Géochimie et Laboratoires de Géochimie et Géologie nucléaires, Université Libre de Bruxelles

RECHERCHES SUR LES INDICES
DE MINERALISATIONS URANIFERES
DANS LA REGION DE VISE

par

A. HERBOSCH^(*), S.M. DE WITTE^(*) et A. PREAT^(*)

(*) Laboratoire de Géochimie et Laboratoires de Géochimie et
Géologie Nucléaires, Université Libre de Bruxelles.

TABLE DES MATIERES

	Page
I. INTRODUCTION	4
II. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU MASSIF DE VISE	
II.1. La situation géographique	6
II.2. La situation géologique	7
II.3. La radioactivité	12
III. PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE	
III.1. Technique de prospection	17
III.2. Resultats de la prospection systématique	20
III.3. Prospection de détail	23
III.4. Conclusions et implications sur l'orientation des recherches ultérieures	23
IV. ETUDE GEOLOGIQUE DES ANOMALIES RADIOACTIVES LIEES AUX CALCAIRES	
IV.1. Localisation géographique	26
IV.2. Description lithologique et stratigraphique - distribution de la radioactivité	28
IV.3. Etudes petrographiques et biostratigraphiques	42
IV.4. Conclusions et synthese	50
V. ETUDE DES ANOMALIES RADIOACTIVES ASSOCIEES AUX BRECHES POLYGENES EN REMPLISSAGE DE POCHEs DE DISSOLUTION	
V.1. Localisation géographique et description lithologique et stratigraphique. Distribution de la radioactivité	54
V.2. Conclusions	
VI. ETUDE DES ANOMALIES RADIOACTIVES LIEES AUX ARGILITES NOIRES DU VISEEN SUPERIEUR	
VI.1. Localisation géographique et description lithologique et stratigraphique. Distribution de la radioactivité	59
VI.2. Conclusions	
VII. ETUDE GEOCHIMIQUE ET MINERALOGIQUE	
VII.1. Les moyens analytiques	64
VII.2. Resultats et interpretation des analyses chimiques	72
VII.3. Localisation de l'uranium à l'échelle microscopique	77
VII.4. Etude mineralogique des phosphates	78
VII.5. Conclusions	81
VIII. CONCLUSIONS	
BIBLIOGRAPHIE.	
ANNEXE : Description macroscopique des échantillons.	

Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce à l'aide financière de la C.E.E. sous la forme d'un contrat d'association avec l'U.L.B. (contrat 77/02578).

Les analyses d'U et P ont été réalisées sur l'installation de fluorescence X appartenant au Collectif Interuniversitaire de Géochimie Instrumentale subventionné par le F.R.F.C. (convention n° 2.4521.76).

Nous tenons tout d'abord à remercier particulièrement les Professeurs E. PICCIOTTO et J. JEDWAB, initiateurs de cette recherche et dont les précieux conseils nous furent des plus profitables.

Nous sommes des plus reconnaissants à ceux qui nous ont fait part de leurs conseils et suggestions : E. POTY pour l'indentifications des coraux, B. MAMET pour le micropaléontologie et P. OVERLAU pour la sédimentologie.

Nos remerciements vont également à Monsieur LEGRAND, du Service Géologique de Belgique, qui a bien voulu nous communiquer les résultats de ses travaux personnels effectués dans la région de Visé. Des analyses de radon ont été effectuées dans le cadre de cette recherche par le Service de G. KOCH au C.E.N. à Mol, et nous tenons à les en remercier très vivement.

Enfin nos plus sincères remerciements vont à J.P. MENNESSIER pour sa contribution dans les analyses chimiques, à N. CROMS et J.M. GILOT pour la réalisation des illustrations, à G. DELVAUX, C. SIMON et E. RAVETS pour la confection des lames minces et surfaces polies.

Mots-clefs : Prospection - Uranium - Phosphates - karst - calcaires - Viséen
Fluorescence X - Scintillométrie gamma - Activation neutronique

Résumé

Situé au N-E de Liège, en bordure de la frontière hollandaise, le Massif de Visé est constitué de terrains essentiellement dévono-carbonifères.

Des anomalies radioactives y étaient connues.

La prospection scintillométrique détaillée du Massif (40 km²) a permis de mettre en évidence 20 nouvelles anomalies. Elles se distribuent essentiellement dans les zones d'affleurements des calcaires viséens ainsi que dans les poches de dissolution qui les surmontent.

L'étude sédimentologique, minéralogique et géochimique montre que ces calcaires appartiennent au Viséen supérieur et que les anomalies radioactives sont liées à la présence d'éléments phosphatés constitués de fluorapatite. Ces mêmes phosphates se retrouvent en bordure des poches de dissolution dont la formation est liée à la phase sudète de l'orogène varisque.

Malgré des teneurs en uranium relativement élevées pour des phosphates, le contexte géologique ne permet pas d'envisager un intérêt économique.

Key-words : Prospection - Uranium - Phosphates - karst - limestones - Visean
X-fluorescence - gamma scintillometry - Neutron activation.

Abstract

Located in the N.E. of Liège, on the Dutch border, the Visé massif consists essentially of devonc-carboniferous strata. Radioactive anomalies were known in this region.

A systematic and detailed scintillometric ground prospection of the whole Visé massif (40 km²) has revealed 20 new anomalies. They are essentially located in the visean limestone outcrops and in the dissolution pockets.

Sedimentological, mineralogical and geochemical studies show that the limestones belong to the Upper Visean and that the radioactive anomalies are due to the presence of phosphatic elements identified as fluorapatite. These phosphates are also found at the edge of the dissolution pockets which formation is related to the sudeten phase of the variscan orogeny. Despite the relatively high uranium content of these phosphates the geological context does not appear to be of any economical interest.

I. INTRODUCTION

Etant donné l'augmentation croissante de la demande en uranium, les réserves actuellement connues et les ressources raisonnablement estimées dans le monde vont se révéler rapidement insuffisantes au-delà de 1985 (NININGER, 1977). Dès lors, la prospection de l'uranium s'est vue fortement encouragée au cours de ces dernières années dans le but d'augmenter les réserves. Les ressources à très basses teneurs - shales noirs, phosphates, roches granitiques, eau de mer - ne pouvant fournir, au mieux, qu'une petite fraction de la demande mondiale, le principal espoir réside dans la découverte de nouvelles provinces uranifères et/ou de nouveaux types de dépôts à teneurs intermédiaires (100-700 ppm d'uranium) de forts tonnages.

D'autre part, depuis une dizaine d'années la recherche minière en Europe fait l'objet d'un renouveau certain (BERTRANEU, 1978). Déjà de nombreux succès en soulignent le bien fondé : nous citerons par exemple le district plombo-zincifère de dimension mondiale mis en évidence en Irlande en quelques années, le développement des ressources du bouclier scandinave, les nombreuses découvertes faites en France (tungstène des Pyrénées, fluorine du Morvan, lithium d'Echassières) et en particulier celles d'uranium.

Le présent travail s'inscrit dans cette double optique : promotion de la prospection de l'uranium et promotion de la recherche minière dans la "vieille" Europe.

C'est en 1956, au cours de levés radiométriques poursuivis de manière systématique par le Service Géologique de Belgique sur le territoire national, que R. LEGRAND découvrit quelques sites anormalement radioactifs dans le Massif de Visé. Cette radioactivité, plusieurs dizaines de fois supérieure au bruit de fond, y est toujours liée à des brèches phosphatées remplissant des poches de dissolution (LEGRAND, 1956). D'autres travaux ont également montré la présence de torbernite et d'autunite dans certaines de ces brèches (JEDWAB, 1958 ; VAN TASSEL, 1959a).

Plus récemment, l'étude minéralogique de l'indice de Richelle a été reprise (FRANSOLET, JEDWAB et VAN TASSEL, 1974a) et a permis de montrer que la minéralisation uranifère n'était qu'un aspect d'un ensemble de phénomènes très complexes, dont les produits minéraux sont très variés.

Sur base de ces connaissances et compte tenu de leur caractère assez fragmentaire et ancien, il paraissait nécessaire de procéder à une réévaluation des indices déjà connus dans la région de Visé, d'y rechercher de nouveaux indices éventuels et de tenter de comprendre leur origine et leur filiation géologique.

II. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU MASSIF DE VISE

II.1. La situation géographique

La région de Visé est située au Nord-Nord-Est de la Belgique (fig. 1) dans la province de Liège, à 10 km au Nord-Est de Liège en bordure de la frontière hollandaise.

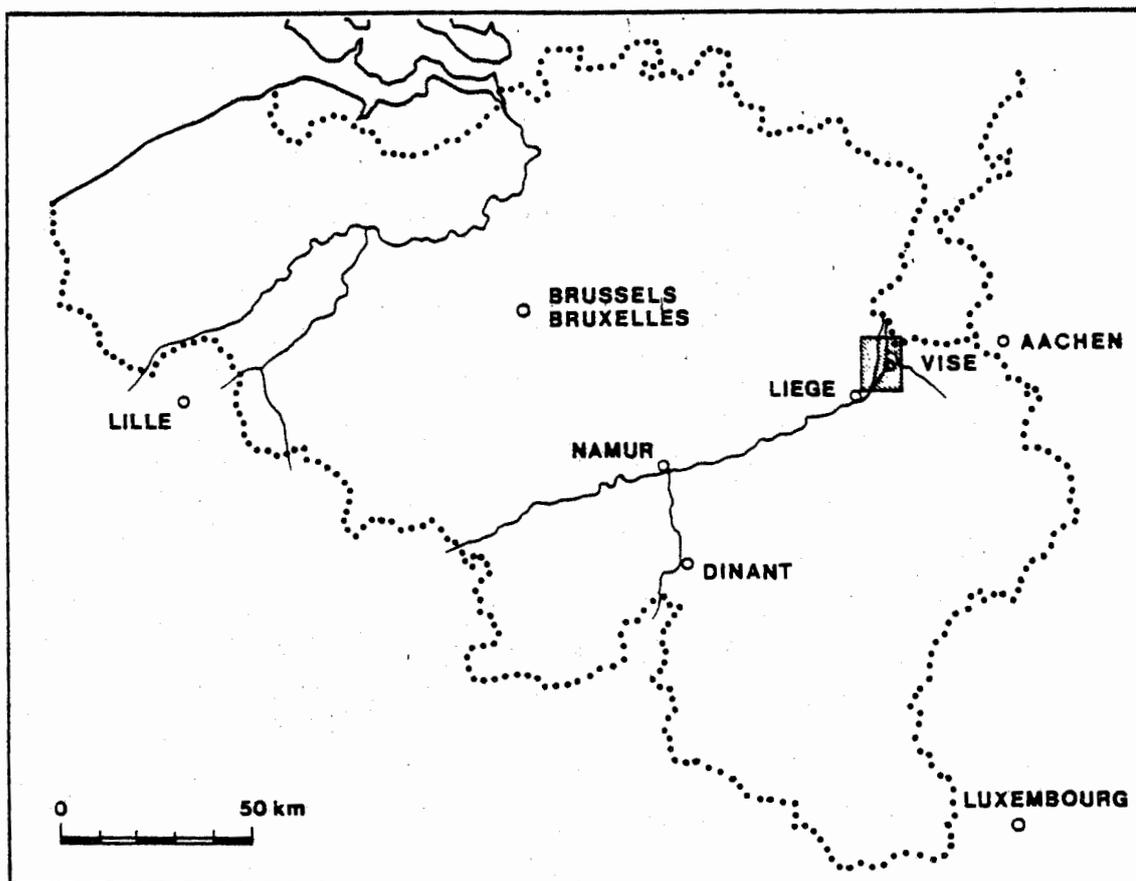


Figure 1 - Situation générale de la région de Visé.

Le Massif de Visé, qui couvre une quarantaine de km², est un anticlinal montrant deux zones importantes d'affleurements :

- la vallée de la Meuse (rive droite),
- la vallée de la Berwinne.

Ce Massif se trouve encadré : au Nord par le Fossé de Ruremonde appartenant au Fossé Rhénan inférieur, à l'Ouest par le Massif du Brabant et au Sud-Est par le Massif de Booze-le Val Dieu (fig. 2). Ce dernier forme l'extrémité Nord du Massif de Herve, lui-même suivi du Massif de la Vesdre. La Faille Eifélienne, prolongement Nord-Est de la Faille du Midi, les sépare.

II.2. La situation géologique

II.2.1. Introduction

Dès le siècle passé le Massif de Visé a suscité, chez les géologues belges et même étrangers, une curiosité passionnée. On trouvera un historique et une bibliographie de ces travaux dans PIRLET (1968). Une série d'articles collectifs très récents : BLESS et coll. (1976, 1977). KIMPE et coll. (1978) témoigne d'un regain d'intérêt pour cette région dont la structure profonde est toujours mal connue.

Les terrains dévono-carbonifères du Massif de Visé, envisagés seulement dans leurs grandes lignes, présentent en apparence une grande régularité d'allure. En réalité, malgré sa faible extension, ce Massif est affecté par une série de dislocations de diverses natures, auxquelles s'ajoute la discontinuité entre les affleurements, ce qui rend très malaisé l'établissement de la série stratigraphique réelle.

On y observe, en effet :

- une série de discordances,
- des lacunes stratigraphiques plus ou moins importantes,
- des paléoreliefs,
- un réseau de failles et de flexures qui est probablement plus dense et plus complexe que ne le laissent voir les affleurements,
- des phénomènes karstiques,

dont la présence simultanée augmente encore les difficultés d'interprétation des observations.

Il convient d'ajouter également que le Dévonien et le Carbonifère de Visé ont

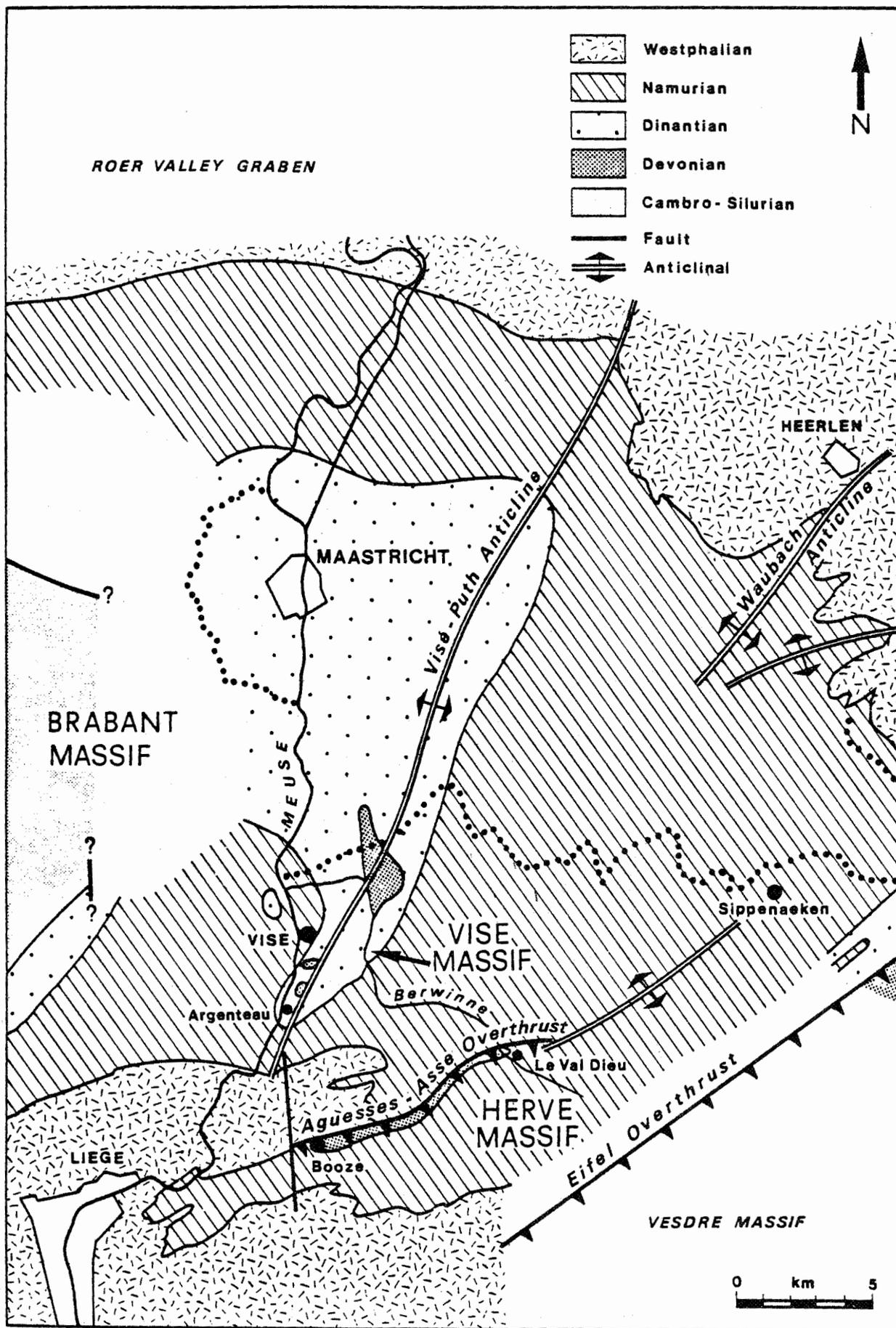


Figure 2 - Situation géologique du Massif de Visé. (d'après BLESS et Coll., 1976).

des faciès très différents, non seulement de ceux observés au sondage de Chertal (LOHEST, 1911), mais aussi de ceux observés dans les régions voisines de Visé (Vallée de la Vesdre, de l'Ourthe, de la Meuse).

"La tendance continue à l'émersion qu'à présentée cette zone, située dans le prolongement de l'axe anticlinal du Brabant, a provoqué des variations de faciès et des discordances rendant la stratigraphie plus difficile à établir" LEGRAYE (1931).

Soulignons l'abondance des fossiles caractéristiques dans les carrières de Visé. C'est ainsi que le "locus typicus" de l'étage supérieur du Dinantien a été choisi à Visé par A. DUMONT (1832) : "Système calcaireux supérieur", et défini comme suit, en 1859, par E. DUPONT :

assise VI du Dinantien : "Assise de Visé"

"Calcaire de nuances et de structures très variées dont les fossiles les plus fréquents sont à la partie inférieure, Productus cora d'Orbigny ; à la partie supérieure le Productus giganteus".

C'est également à cette région que l'on doit le plus grand nombre de nouveaux minéraux découverts en Belgique (MELON et coll., 1976) :

- Delvauxite (Berneau)	$\text{Fe}_5^{3+} (\text{PO}_4)_4 (\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	DUMONT, 1793
- Destinézite (Richelle)	$\text{Fe}_2 (\text{PO}_4) (\text{SO}_4) (\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	FORIR, 1879
- Richellite (Richelle)	$\text{CaFe}_3 (\text{PO}_4)_3 (\text{OH})_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	CESARO et DESPRET, 1883
- Koninckite (Richelle)	$\text{Fe PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} (?)$	CESARO, 1884
- Viséite (Visé)	$\text{NaCa}_5 \text{Al}_{10} \text{Si}_3 \text{P}_5 \text{O}_{30} (\text{OH})_{18} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	CESARO, 1888
- Drugmanite (Richelle)	$\text{Pb}_2 (\text{Fe}^{3+}, \text{Al}) (\text{PO}_4)_2 (\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$	VAN TASSEL, FRANSOLETT et ABRAHAM, 1979.

Signalons en outre qu'environ trente espèces minéralogiques ont été répertoriées (FRANSOLETT et coll., 1974 a) dans des brèches phosphatées colmant des poches de dissolution du calcaire viséen.

- après la pénéplanation post-hercynienne, les transgressions crétacées déposent la smectite hervienne et les craies du Campanien puis les craies argileuses et tuffeaux du Maestrichtien.
- vient ensuite une vaste transgression tertiaire dont il ne subsiste que des sables oligocènes dans des poches de dissolution affectant les craies et tuffeaux.
- au Quaternaire, la Meuse accumule les graviers, sables et limons des terrasses et de la plaine alluviale tandis que les loess tapissent la surface des plateaux.

Toutefois, il est intéressant de noter que des études très récentes (BLESS et coll. 1976, 1977 ; KIMPE et coll., 1978) bouleversent les interprétations anciennes concernant la structure du Massif de Visé. Ces auteurs avancent l'hypothèse de l'existence de roches évaporitiques, éventuellement d'âge Dévonien moyen, dans l'Anticlinal de Visé-Puth. Cette hypothèse est étayée par les arguments suivants :

1. la concordance avec une anomalie gravimétrique négative dans la partie occidentale du Sud-Limbourg ;
2. les nombreuses structures sédimentaires comparables à celles observées au-dessus de diapirs ;
3. les mouvements constants qui affectent la sédimentation depuis la fin du Dévonien jusqu'au Crétacé supérieur ;
4. la direction anormale des axes des anticlinaux de Visé-Puth, Ham et Krawinkel ;
5. la présence de teneurs en chlorure très élevées dans les eaux.

La convergence de ces données semblent en faveur de la probabilité de cette hypothèse.

D'autre part, une halokinèse lente et de longue durée comme cause des mouvements verticaux continus semble plus plausible que des phases orogéniques successives dans un environnement géographique restreint et stable.

II.3. La radioactivité

II.3.1. Radioactivité des roches

Comme nous l'avons déjà signalé succinctement dans l'introduction, une série de sites à radioactivité anormalement élevée ont été mis en évidence dans le Massif de Visé par LEGRAND (1956, 1958). Ces sites s'échelonnent le long de la Meuse et de la Berwinne, depuis le Nord de Berneau jusqu'à Argenteau (fig.4). Ces anomalies, dont le niveau s'élève à plusieurs dizaines de fois le fond continu, sont liées à des brèches phosphatées localisées dans des poches de dissolution. Ce même auteur les décrit de la manière suivante :

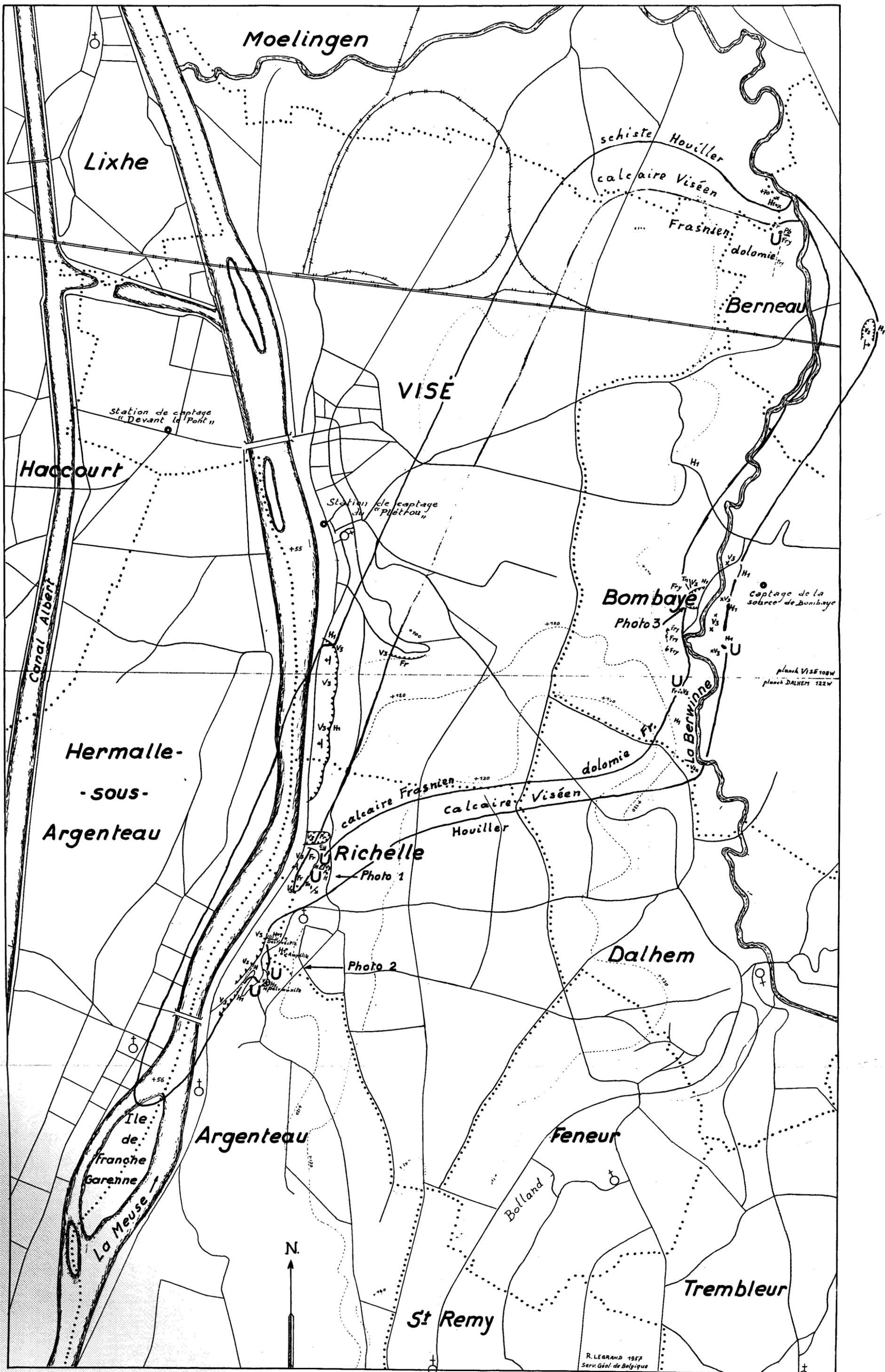
"Les brèches radioactives ne sont pas des brèches sédimentaires. Ce sont des brèches remaniées se rencontrant soit entre les formations calcaires, viséennes ou frasniennes, et les formations schisteuses et phtaniteuses du Namurien et du V3c de faciès Culm, soit vers la base des formations schisteuses, mais à quelques mètres seulement au-dessus du calcaire. Il ne s'agit pas d'un niveau lithologique, du moins dans son état actuel ; s'il l'a été, il est actuellement réduit en bouillie rocheuse constituant un matelas discontinu entre schistes phtanitiques et calcaires" (1956, pp.211-212).

Ces brèches sont composées de fragments peu modifiés de schistes siliceux et phtanites du Viséen supérieur et du Namurien, ainsi que de cherts et calcaires silicifiés. Les éléments sont emballés dans un ciment induré mais non lapidifié de couleur gris perle, jaunâtre ou brunâtre. L'analyse de ce ciment (LEGRAND, 1956 ; VAN TASSEL, 1959a) montre qu'il est riche en phosphore (5-10 % P_2O_5) ce qui est attribué, par ces auteurs, à la présence bien connue dans ces brèches, de phosphates de fer tels que koninckite, delvauxite, richellite.

La silicification de ces brèches s'accompagne d'un abaissement de la radioactivité proportionnel à l'intensité de leur silicification.

Les teneurs en uranium des brèches à ciment phosphaté sont comprises entre 300 et 1000 ppm (LEGRAND, 1956). Des investigations minéralogiques plus détaillées ont permis à JEDWAB (1958) et VAN TASSEL (1959a) d'y mettre en évidence de l'autunite et de la torbernite.

Pour LEGRAND (op.cit.) le processus de formation de ces brèches est dû à la



U: Ry > 0,1 milia kuent en 7 heure

Echelle: 1/10.000^e

R. LEGRAND 1957
Serv. Géol. de Belgique

dissolution des calcaires par les produits d'oxydation du houiller pyriteux. Si ce schéma explique bien la formation et la localisation des brèches, par contre il n'explique ni la présence de phosphates ni celle de l'uranium.

Dans un remarquable article, GRAULICH (1963) est le premier à fournir un schéma cohérent concernant la genèse de ces brèches et des minéralisations uranifères associées. Cet auteur démontre que les poches de dissolution se sont formées suite à la phase sudète des plissements varisques qui atteint la région de Chertal-Visé entre les dépôts de la zone H2 et de la zone R1 du Namurien. On trouve en effet, dans les poches de dissolution des schistes ampéliques E2b2 tandis que dans la série stratifiée surmontant les poches, le niveau marin le plus inférieur appartient à la zone R1 (fig. 3). Dès lors, GRAULICH (op.cit.) schématise la suite des événements comme suit :

- 1° dépôt des calcaires viséens ;
- 2° dépôt des schistes fins, schistes pyriteux à faciès marins de la zone E1(?) et des sous-zones E2a, E2b1, E2b2 au moins ;
- 3° exondation de la région (phase sudète) avec érosion physique et chimique. Formation des poches de dissolution et descente lente des sédiments namuriens dans ces poches ;
- 4° nouvelle transgression de l'aire de sédimentation. Les niveaux marins (schistes) les plus inférieurs sont datés par des *Reticuloceras* de la zone R1.

La concentration de l'uranium dans les brèches s'explique alors par le processus suivant :

"Des schistes noirs, fins, pyriteux et radioactifs se sont normalement déposés sur les calcaires viséens. A la suite d'un ridement, ce massif a été exondé, ce qui a entraîné une oxydation de la pyrite avec libération d'acide sulfurique qui a dissous les sels d'urane des schistes namuriens. Ces mêmes sels ont été précipités quand l'acide sulfurique a été neutralisé en attaquant le calcaire sous-jacent. Ces phénomènes n'ont pu se produire que dans la zone d'oxydation et de percolation des eaux." (1963, p. 193).

II.3.2. Radioactivité des eaux

En 1973, une radioactivité anormale des eaux de distribution de la ville de Visé fût découverte fortuitement par un de ses habitants. Suite à cette découverte et à une certaine agitation de la population, le Ministère de la Santé Publique fit procéder à l'analyse des eaux des différents captages.

TABLEAU I : Analyses du radon dans l'eau de distribution de Visé

Lieu de prélèvement	Date de prélèvement	Rn 222* (pCi/l)	Laboratoire d'analyse
Captage de PLETROU	03/1973 à 12/1973	22.900 à 31.600	(1)
Captage de BOMBAYE	3 mesures en 1973 1 mesure en 1975	770 à 980	(1)
	1975	940	(2)
Captage de DEVANT-LE PONT	1 mesure en 1975	435	(1)
	1 mesure en 1975	435	(2)
Eau d'EUPEN	-	1,1 à 1,3	(1)
	-	1,15	(2)
Eau de la MEUSE	2 mesures en 1973	7	(1)

(1) Laboratoires du Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, (C.E.N.) de MOL.

(2) Contrôle-Radioprotection de Bruxelles.

* Gaz rare, émetteur alpha de période 3,8 jours, membre de la famille U 238.

Les analyses du radon, reportées en tableau I, montrent :

- 1° de très fortes teneurs dans les eaux du captage de Plétrou implanté dans les alluvions de la Meuse, rive droite ;
- 2° des teneurs anormales dans les captages :
 - de Bombaye, implanté à proximité du contact Viséen-Namurien (fig. 4) ;
 - de Devant-le-Pont, implanté dans les alluvions de la Meuse, rive gauche ;
- 3° des teneurs normales dans les eaux de distribution provenant du barrage d'Eupen et celles de la Meuse.

Les concentrations anormales en radon ont été attribuées par les experts (rapports d'expertises aimablement communiqués par Madame CAHAY, bourgmestre de Visé) à la présence d'uranium dans le sous-sol de Visé.

III. PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE

Etant donné l'ancienneté, le caractère très partiel des études antérieures (cf. II.3) et les impératifs du présent programme de recherche, une importance primordiale a été donnée aux travaux de terrain. Ceux-ci débutèrent par une prospection scintillométrique pédestre systématique (tactique au sens de GRANIER, 1973) de l'entièreté du Massif de Visé.

III.1. Technique de prospection

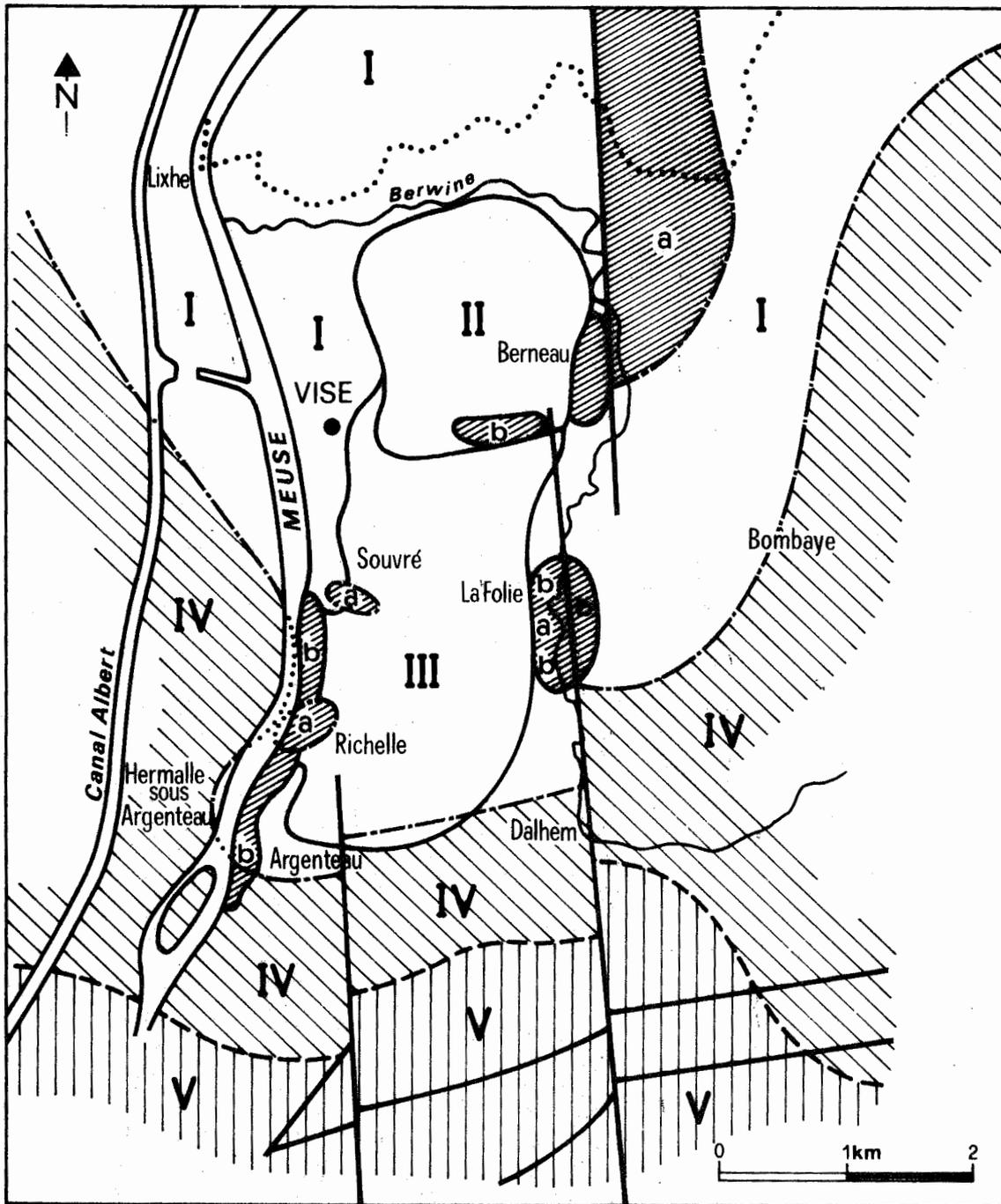
L'appareil utilisé est un scintillomètre portatif de marque GEC-ELLIOTT NE 148A, enregistrant les rayons gamma totaux. Son bruit de fond est de l'ordre de 5 $\mu\text{R/h}$. Extrêmement sensible, cet appareil possède 3 échelles de mesures :

	échelle couverte	temps de réponse
X1	0 à 30 $\mu\text{R/h}$	2 sec
X10	0 à 300 $\mu\text{R/h}$	0,2 sec
X100	0 à 3 mR/h	0,02 sec

Toutes les mesures ont été effectuées en maintenant l'appareil à hauteur de genoux.

Le fond continu régional a été estimé en premier lieu, en effectuant une série de mesures en des points choisis arbitrairement et répartis selon un réseau à mailles carrées d'un km de côté. Ce fond continu est de l'ordre de 9 $\mu\text{R/h}$.

La couverture radiométrique du Massif de Visé et de ses abords immédiats (40 km^2) a été réalisée en parcourant systématiquement à pied tout le réseau routier, les sentiers, les bords de rivières. De plus, les flancs des vallées (Meuse et Berwinne, y compris les carrières) ont été parcourus de façon plus dense, à travers champs et bois. La distance ainsi parcourue est de plus de 200 km. La densité moyenne de parcours est comprise entre $2,5 \text{ km/km}^2$ au minimum et 12 km/km^2 et plus au maximum, ce qui peut être considéré comme très satisfaisant.



- terrains de couverture

- I** zone où les schistes et grès namuriens sont recouverts par la plaine alluviale (limons, sables, graviers)

- II** zone où les dépôts crétacés supérieurs (smectite permienne - Cp₂) surmontent les calcaires paléozoïques

- III** zone où les dépôts crétacés supérieurs (craies et tuffeux - Cp₃) surmontent les calcaires paléozoïques

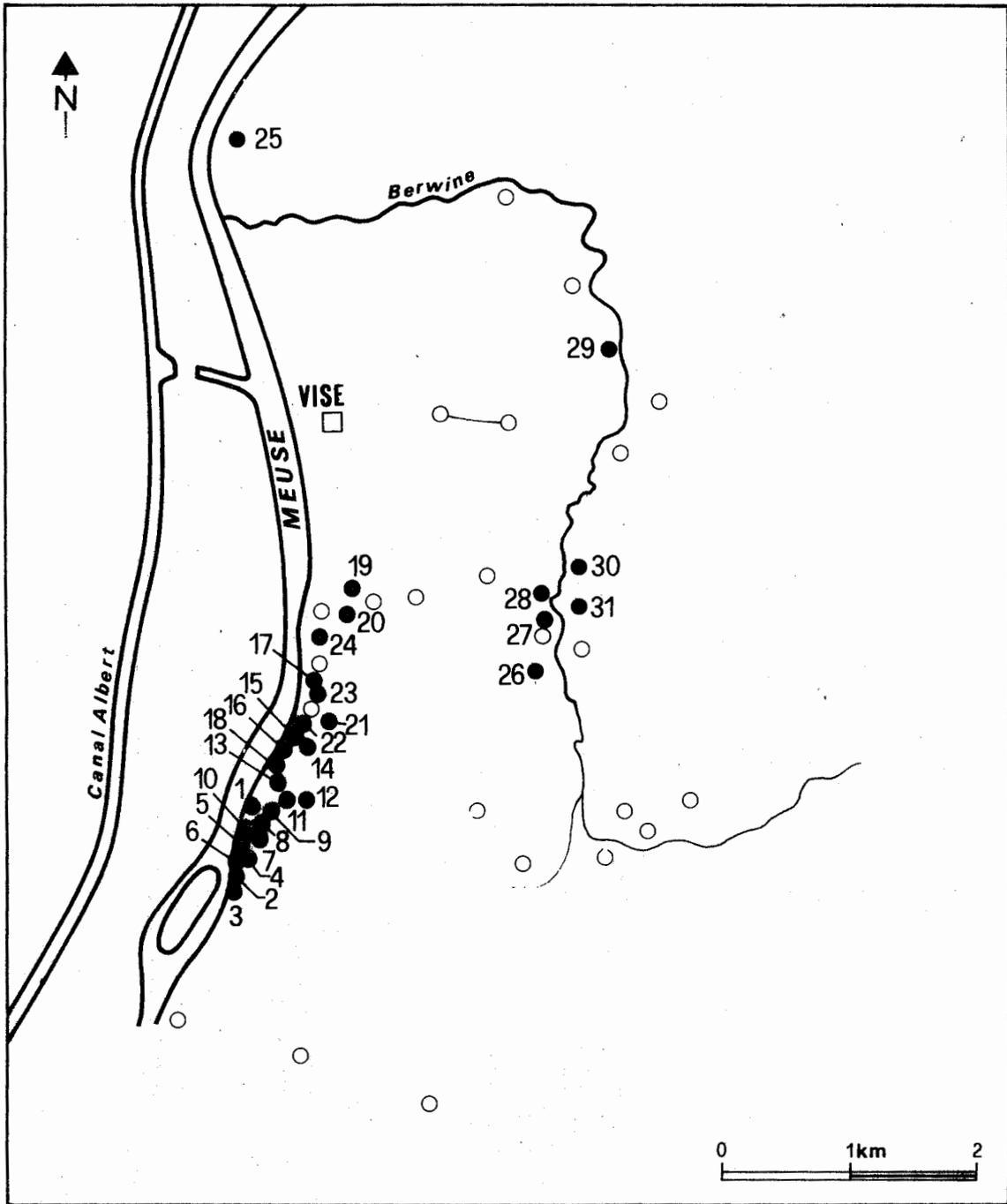
- IV** zones d'affleurement des schistes et grès namuriens

- V** zones d'affleurement des schistes westphaliens

- Dévonien supérieur (a) et Dinantien (b)

- faille

- niveau d'érosion



● affleurements avec anomalie :

1	: A*/A	19 et 20	: VS-CK
2 et 3	: A/C	21	: VS-CM
4 à 6	: A/D	22	: VS-CN
7 à 12	: A/B	23	: VS-CL
13	: R/E	24	: VS-CF
14	: R/F	25	: L/L
15	: R/G	26	: D/M
16	: R/H	27	: D/N
17	: R/I	28	: BO/O
18	: R/J	29	: Be/P
		30 et 31	: <u>BO/R</u>

Fig. 6

○ affleurements sans anomalie

* La première lettre correspond à la localité et la seconde renvoie au sous-groupe du Tableau II. Exemple : BO/R = Bombaye, sous-groupe R.

La lecture se faisant de façon continue, seules ont été notées les mesures effectuées en des stations facilement repérables géographiquement, ainsi que toutes les valeurs supérieures ou égales à 20 $\mu\text{R/h}$, considérées comme anomalie (environ deux fois le fond continu régional).

III.2. Résultats de la prospection systématique

III.2.1. Le fond continu

Il est très rapidement apparu qu'il n'existe pas un fond continu régional unique mais que ce dernier est manifestement lié aux principales unités géologiques affleurantes (fig. 5), à savoir :

- les formations de couverture quaternaires et/ou crétacées
(quelques mètres à quelques dizaines de mètres de puissance) recouvrant les roches du Paléozoïque. Il s'agit essentiellement d'argiles et de terrasses alluvionnaires de la Meuse (zones I, II et III de la figure 5).
Le fond continu y est inférieur à 10 $\mu\text{R/h}$.
- les formations namuriennes qui bordent au S. et à l'E. le Massif de Visé.
Ces dernières sont essentiellement constituées de shales noirs avec intercallations de grès (zone IV de la figure 5).
Le fond continu y est entre 12 et 16 $\mu\text{R/h}$.
- les roches carbonatées du Paléozoïque.
Représentées par des calcaires et des dolomies (Dévonien et Dinantien de la figure 5).
Le fond continu y est inférieur à 10 $\mu\text{R/h}$.
En ce qui concerne les roches carbonatées, remarquons qu'elles affleurent essentiellement dans des carrières ou sur de petites surfaces, que la plupart des anomalies radioactives y sont liées et qu'en conséquence l'estimation d'un fond continu y est fort difficile.

TABLEAU II : Caractéristiques des anomalies naturelles, anciennes et nouvelles.

Localités et groupes	sous groupes	n°	Echantillons	Intensité $\mu R/h$	Coordonnées Lambert (km)		surface (m ²)	nouvelle anomalie	Localisation et nature des anomalies	
					N	E				
VALLEE DE LA MEUSE										
ARGENTEAU Gr 1	A	1	A/A34 ₁₋₂₋₃	25	156,58	243,04	x ⁴		Bas côté de la route, quelques pointements calcaires dans le talus.	
	C	2	A/C 1à42 R/C 171à176	170à350 350 max	156,34à44	243,02	x.10 ²	x	Petite falaise de calcaire en bancs métriques inclinant faiblement vers le Sud, fissurée et injectée de grès et brèches phosphatées responsables de la radioactivité (> 300 $\mu R/h$). Au centre brèches polygènes dans karst.	
		3		100à150	156,43	243,06	x	x	Petit affleurement calcaire à éléments phosphatés, situé dans le parc du château prolongement de l'affleurement précédent(n°2).	
	D	4	A/D 1à4 A/D 164-168-170-177à183	20à30 50à100 300 max	156,59	243,13	x.10 ²	x	Talus de l'allée N. du château d'Argenteau. Nombreux pointements calcaires. Radioactivité liée à des éléments phosphatés noirs situés dans les fractures, joints etc.. Localement 300 $\mu R/h$.	
		5		70	156,53	243,09	x.10 ⁻¹	x	Entrée d'une grotte, face Nord du piton rocheux qui supportait le vieux château d'Argenteau.	
				20à30 70	156,51	243,09	x	x	Niveau à éléments phosphatés. Poche de dissolution à la base du rocher calcaire.	
		6		100à200	156,48	243,08	x.10 ⁻³	x	Masses phosphatées injectées dans les calcaires situés de part et d'autre d'un petit ravin situé derrière les maisons et au Sud du piton rocheux.	
	Gr 2	B	7	A/B 1à32bis	25à35	156,66à70	243,15à20	x		Bas côté de la route qui monte vers Richelle, quelques pointements calcaires dans le talus
			8		25à40	156,71à77	243,23à26	x		Talus en forte pente. Pas d'affleurements, sols éboulés.
			9		22à26 480 max	156,63à77 156,72	243,25à29 243,31	x.10 ⁰ x.10		Talus bordant la route côté amont. S'étend jusqu'à la prairie qui surmonte le talus. Brèches à ciment jaune remplissant une poche de dissolution : "site d'Argenteau" (LEGRAND, 1956;1958)
			10		100à300 300 max	156,61à74	243,19à31	x.10 ³	x	Coupe mise au jour par des travaux effectués sur la route montant du Tourne- bride vers Richelle. Karst rempli essentiellement par des shales namuriens, quelques brèches polygènes fortement radioactives. Pointements calcaires à la base.
			11		30à40	156,85	243,28	x.10 ²	x	Ampélites calcinées rouges en déblais.
12			30 70		156,55 156,65à75	243,29 243,25à35	x.10 ³		Prairie qui surmonte la poche de dissolution citée en 9	
RICHELLE Gr 3	E	13	R/E119à120bis	30 25à50 90max.	156,04 157,00à85	243,39 243,35à41	x x	Talus en forte pente situé en aval de l'église de Richelle. Roches schisteuses noires (auxquelles semble lié le maximum de radioactivité) et roches silicifiées brunes (Namurien?) Anomalies de part et d'autre de la route.		

TABLEAU II : Caractéristiques des anomalies naturelles, anciennes et nouvelles.

Localités et groupes	sous groupes	n°	Echantillons	Intensité $\mu R/h$	Coordonnées Lambert (km)		surface (m ²)	nouvelle anomalie	Localisation et nature des anomalies
					N	E			
VALLEE DE LA MEUSE (suite)									
Gr 4	F	14	R/F	40à80	157,30	243,51	x		Petits pointements calcaires dans des talus en fortes pentes, au bord W de la carrière M de Richelle (PIRLET, 1967b) le long du sentier qui descend de Richelle vers la grand route.
	G	15	R/G	30à70	157,53	243,40	x		Talus en fortes pentes en aval de 14 aux alentours du même sentier.
	H	16	R/H	25à40	157,35	243,49	x.10		Affleurement de calcaire massif presque en bas de la pente. Eléments phosphatés noir
	I	17	R/I	20à30	157,56	243,50	x.10	x	Petite falaise à l'extrémité Sud de la grande carrière L' (PIRLET, 1967b); poche de dissolution remplie d'une brèche à petits blocs de phtanites.
	J	18	R/J1à5	20à25 100à150	157,14	243,42	x.10 ²		"Site de Richelle" (LEGRAND, 1956; 1958) Poche de dissolution au sommet d'un escarpement calcaire. Brèches polygènes jaunes à brunes à blocs de phtanite.
WISE - SOUVRE Gr 5	K	19	VS-K1à13	25à30 50 max	158,44	243,89	x.10 ²	x	Affleurement de brèches cyclopéennes (Frasnien) dans le vallon de Souvré sous la route Visé-Dalhem. Nombreux fragments phosphatés dans le ciment de la brèche. Au centre de l'affleurement, brèche polygène à ciment jaune à orangé remplissant une poche de dissolution.
		20		25à30					158,14
Gr 6	CM	21	VS-CM 31-32, 55 a-b-e 56	30à60	157,48	243,56	x	x	Carrière M de Visé. Poche de dissolution à remplissage bréchiq.ue.
	CN	22	VS-CN 1à6	50à60 150à300	157,28	243,46	x.10	x	Carrière N de Visé. Roches de dissolution à remplissage bréchiq.ue orangé (250à300 $\mu R/h$) et gris à nombreux fragments de phtanites (150 à 200 $\mu R/h$).
Gr 7	CL	23	VS-CL	20à30	157,74	243,64	x	x	Carrière L de Visé (PIRLET, 1967b) Petites concrétions phosphatées dispersées dans la brèche calcaire.
Gr 8	CF	24	VS-CF1à11	60à100 150 max	158,14	243,58	10à20 cm	x	Niveaux (3) d'argilites noires interstratifiées dans les calcaires du V3c inférieur (PIRLET, 1967b).
LIXHE Gr 9	L	25	L/L	20 - 25 (30 rare)	161,00	243,04	x	x	Poche de dissolution visible dans l'excavation (\pm 40 m de profondeur) ouverte pour les travaux de la nouvelle écluse de Visé. Petits bancs de phtanites décolorés et d'argiles grises.
VALLEE DE LA BERWINNE									
Rive gauche DALHEM Gr 10	M	26	D/M 1à8	25à40 120à150	157,87	245,36	x.10		Ferme du Chafour. Pointements calcaires et anciennes carrières à flanc de coteaux. Prairies avoisinantes. Nombreux petits éléments phosphatés dans la brèche calcaire
Gr 11	N	27	D/N 1à6	70	158,19	245,31	x	x	Boues argileuses grises, affleurant au sol à quelques mètres de la Berwinne.
BOMBAYE Gr 12	O	28	BO/O 1à5	30 60(max.)	158,36	245,37	x.10	x	Ancienne carrière de la Folie. Brèche calcaire à nodules noirs phosphatés du V1 β (PIRLET, 1967 a).
BERNEAU Gr 13	P	29	Be/P1	30à40	160,38	245,82	x	x	Ferme du Longchamps. Bord d'un chemin creux: Horizons pédologiques (B) argileux versicolours.
Rive droite BOMBAYE (Mons) Gr 14	R	30	BO/R 1à20 _c	20à40 70 max.	158,41 158,27	245,52à63 245,57à65	x.10 ⁴		Versant assez pentu de la vallée de la Berwinne. Les anomalies s'étendent sur plusieurs centaines de mètres dans des prairies à nombreux pointements calcaires ainsi que dans deux anciennes carrières. Des éléments phosphatés sont visibles dans le ciment des brèches calcaires.

x* = de 1 à 9

III.2.2. Les anomalies

Cette prospection a permis la mise en évidence de 30 anomalies au total (tableau II). Parmi celles-ci une bonne vingtaine sont nouvelles, les autres ayant déjà été signalées par LEGRAND (op. cit., cf. II.3).

D'une manière générale, la distribution de la radioactivité est très hétérogène au niveau de l'affleurement, les valeurs variant de 10 à 100 $\mu\text{R/h}$ et quelquefois plus, sur une très faible distance (quelques centimètres).

Notons également que cette prospection scintillométrique pédestre systématique a permis de localiser avec précision tous les affleurements (avec ou sans anomalies radioactives) de la région de Visé (fig. 6).

III.3. Prospection de détail

Au terme de la prospection pédestre systématique, la suite des recherches fut orientée vers une prospection scintillométrique extrêmement fouillée aux alentours de chaque anomalie déjà reconnue, tout en tenant compte de leurs caractères géologiques. Ceci permit de circonscrire d'importantes extensions et de constater en fait que certaines anomalies devaient être rassemblées en sous-groupes (lettres majuscules de A à S) et eux-mêmes en 14 grands groupes (de 1 à 14), car elles ne formaient en réalité que quelques entités au point de vue géologique (cf. tableau II). Citons en exemple les sous-groupes A, C et D qui forment une seule unité (groupe 1) ; il en est de même pour F, G, H, I et J (groupe 4).

III.4. Conclusions et implications sur l'orientation des recherches ultérieures

Au terme de cette prospection scintillométrique, il a été possible :

1. de localiser avec précision tous les affleurements (avec ou sans anomalies radioactives) (fig. 6) ;
2. d'inventorier de manière exhaustive toutes les anomalies radioactives (anciennes et nouvelles) du Massif de Visé (tableau II). Elles sont au nombre de 30 dont 20 nouvelles ;
3. de mesurer la radioactivité qui s'échelonne de 20 $\mu\text{R/h}$ (deux à trois fois le fond continu) à près de 500 $\mu\text{R/h}$;

4. de constater que ces anomalies se distribuent exclusivement dans les zones d'affleurement des terrains dévoniens supérieurs et dinantiens (fig. 5, 6 et 7). On se trouve en présence d'une assez forte concentration d'anomalies pour une faible surface d'affleurement ;
5. de classer ces anomalies sur base de la géologie de terrain.
L'observation géologique permet, en effet, de les séparer en trois groupes homogènes et très distincts :
 - les calcaires (15 anomalies),
 - les brèches polygènes en remplissage des poches de dissolution (10 anomalies),
 - les argilites noires du Viséen supérieur (1 anomalie) ;
6. d'affirmer que les anomalies radioactives ne sont pas uniquement liées aux brèches polygènes comme le pensaient les géologues jusqu'à présent (cf.II.3).

Parmi les six points constituant ces conclusions, les deux derniers ont d'importantes implications quant à l'orientation à donner à la suite du travail. En effet, ces trois groupes d'anomalies se distinguent très nettement l'un de l'autre, tant sur le plan lithologique que gîtologique. Il est donc clair que les méthodes d'études devront être adaptées à chaque groupe en particulier. D'autre part, l'importance à donner à chacun d'entre-eux ne peut-être la même et ce, pour diverses raisons.

Tout d'abord au point de vue de la surface affleurante : les calcaires (anomalies 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 16, 17, 19, 23, 26, 28, 30) présentent des surfaces d'affleurement nettement supérieures à celles des brèches polygènes (anomalies 2, 5, 9, 10, 13, 17, 18, 19, 21, 22). Les argilites (anomalie 24) ne constituent que de minces niveaux affleurant uniquement dans la "carrière F" des carrières de Richelle.

Ensuite, au point de vue génétique : vu leur origine vraisemblablement "primaire" les anomalies liées aux calcaires sont rapidement apparues comme essentielles dans la résolution du problème posé par la présence d'uranium dans le Massif de Visé, alors que les brèches remaniées ont une origine secondaire certaine (cf. II.3.1).

En conséquence l'étude des anomalies liées aux calcaires sera abordée de manière très complète, d'autant plus qu'elles n'ont fait l'objet d'aucune description antérieure .

L'étude géologique de chacun des trois groupes d'anomalies reconnues fera l'objet de chapitres distincts (ch. IV, V et VI). Par contre leur étude géochimique et minéralogique sera traitée dans un chapitre unique (ch. VII).

IV. ETUDE GEOLOGIQUE DES ANOMALIES RADIOACTIVES LIEES AUX CALCAIRES

IV.1. Localisation géographique

IV.1.1. Argenteau

a) Grand piton rocheux et affleurements voisins⁺ (D groupe 1)

Ils sont situés le long de l'allée d'accès Nord du château d'Argenteau (dont l'entrée se situe à une cinquantaine de mètres du restaurant "Tourne-Bride", à droite dans la direction de Richelle).

Les premières anomalies se situent à gauche dans le talus bordant les cinquantes premiers mètres de cette allée. On en trouve ensuite une série localisée à la base du piton rocheux : d'abord dans une petite grotte transformée en chapelle ainsi que dans ses alentours immédiats, ensuite sous la passerelle qui enjambe l'étroit ravin séparant le château actuel du piton rocheux, enfin sur la face Ouest du piton, derrière les maisons.

Tous ces affleurements appartiennent au bord Sud du Massif de Visé.

b) Affleurement de la "Statue" (C groupe 1)

Cet affleurement est situé, presque en face du pont de Hermalle-sous-Argenteau, le long de la route Cheratte-Visé (observation nouvelle, DE WITTE, 1977, p. 41).

Il s'agit d'une petite falaise au pied de laquelle se trouve une statue du Sacré-cœur (photo 1, Pl.I).

Un grand nombre d'anomalies radioactives y sont relevées. D'autres anomalies ont été trouvées au-dessus de la falaise dans la direction des jardins des maisons, et en particulier une très importante localisée dans le fond d'un des jardins sur une paroi de 3-4 mètres de haut.

IV.1.2. Richelle

c) Pointements calcaires (F à J groupe 4)

Ils sont situés le long du sentier descendant de Richelle vers la grand route Liège-Visé. Bien qu'ils présentent des anomalies radioactives certaines, ils affleurent dans de mauvaises conditions (taillis, éboulis de pente) ce qui rend leur étude malaisée.

(+) La vieille forteresse d'Argenteau, dont la fondation remonte à 1070, et qui fut à plusieurs reprises partiellement détruite, se dressait sur ce piton en face du pont de Hermalle.

IV.1.3. Visé

d) Carrière "L" des carrières de Richelle (CL groupe 7)

Elle est localisée le long de la route Liège-Visé-Maastricht (rive droite de la Meuse). Les anomalies y sont très locales et dispersées dans le calcaire.

IV.1.4. Vallon de Souvré

e) Affleurement "du cheval" (CK groupe 5)

Il s'agit de l'affleurement "A" de HORION et GOSSELET (1892). Il est situé en contrebas de la route en corniche Dalhem-Visé, à gauche et derrière une écurie. On observe une falaise d'une dizaine de mètres de haut sur 30 à 40 mètres de large (photo 2, Pl.II).

Les anomalies y sont très locales et dispersées sur tout l'affleurement.

IV.1.5. Dalhem

f) Affleurements de la "Ferme du Chafour" (M groupe 10)

Ils sont situés sur la rive gauche de la Berwinne. On y accède en empruntant une petite route partant sur la droite de la route Dalhem-Visé et menant au lieu dit "Croix du renard". Ces affleurements sont situés juste au Nord de la ferme, sur le versant assez raide et boisé (photo 4, Pl.II). Il s'agit d'anciennes exploitations de pierre de taille (HORION et GOSSELET, 1892).

Les anomalies sont ponctuelles et dispersées.

IV.1.6. Bombaye

g) Carrière de "La Folie" (C groupe 12)

Elle est située sur le territoire de Bombaye à huit cents mètres en amont du hameau de Mons, sur la rive gauche de la Berwinne entre Dalhem et Berneau. Les anomalies sont localisées dans la partie récemment exploitée de la carrière, côté Est (ensemble e, PIRLET, 1967a).

h) Séries d'anciennes petites exploitations (R groupe 14)

Elles sont situées sur la rive droite de la Berwinne en face de la carrière de "La Folie" (photo 5, Pl.II). La première de ces carrières se localise derrière deux maisons construites près du pont traversant la Berwinne, et près desquelles on retrouve des vestiges d'un ancien four à chaux (HORION et GOSSELET, 1892).

Les anomalies sont situées dans une petite paroi au Nord du four à chaux, ainsi que sur une assez grande surface de jardins au Sud des deux maisons et en bordure de la Berwinne.

Les autres affleurements, dont une petite carrière (photo 6, Pl.II) se trouvent dispersés dans des prairies assez pentues à deux cents mètres au Sud des maisons (face à la carrière de "La Folie").

Une anomalie de vaste étendue s'observe dans la petite carrière ainsi que dans les prairies qui l'entourent et descendent vers la Berwinne : sur une centaine de mètres vers le Sud et le Sud-Ouest, sur une cinquantaine de mètres vers le Nord et le Nord-Ouest.

IV.2. Description lithologique et stratigraphique

Distribution de la radioactivité

IV.2.1. Argenteau

a) Grand piton rocheux et affleurements voisins (D groupe 1)

Ces affleurements sont formés, en majeure partie, de brèches calcaires grossières d'aspect massif. Localement, dans le piton rocheux, on observe d'autres calcaires en bancs épais inclinant vers le Sud de 10 à 20°. La présence de brèches phosphatées et/ou d'éléments de phosphates de couleur brun-noir dans les joints, les fractures et fissures affectant le calcaire est nettement observable, bien que l'aide du compteur se soit révélé très utile pour les repérer. Citons en particulier le flanc Sud du ravin sous la passerelle et la série d'affleurements dans le talus côté Est de l'allée d'accès Nord du château.

Par contre, les anomalies décelées dans le piton rocheux sont beaucoup plus dispersées (+). Les éléments phosphatés sont généralement de petite taille et ne s'observent qu'à l'aide du compteur. Ils sont également dans des structures sécantes. L'anomalie localisée dans la petite grotte (allée d'accès Nord du château, côté Ouest) est vraisemblablement liée à un karst, des phosphates en éléments brèchiques y sont bien visibles (photo couleur,7). L'intensité de la radioactivité est très variable : 40 à 250 μ R/h. Elle est clairement proportionnelle au volume occupé par les éléments phosphatés et tranche très nettement sur l'activité très basse des calcaires normaux (12 à 15 μ R/h).

b) Affleurement de "La Statue" (C groupe 1)

Cet affleurement présente sans aucun doute un intérêt tout particulier en ce qui concerne le sujet de cette étude.

Les raisons en sont nombreuses, citons : les excellentes conditions d'affleurement, la présence de nombreux phénomènes géologiques sur une très petite surface (fractures, faille, poche de dissolution, ...), une forte radioactivité, enfin l'abondance de phosphates sous des structures variées. Fort curieusement, aucune mention ou description de cet affleurement n'a été trouvée dans la littérature.

Dans son ensemble, cet affleurement est formé de calcaires crinoïdiques bien stratifiés (10 à 20° S), d'allure régulière. Celle-ci est interrompue en son milieu par une zone assez confuse où l'on distingue : côté gauche une brèche de faille et côté droit une brèche polygène typique des remplissages de karst.

L'observation permet de distinguer trois parties :

- à l'extrémité Nord, les bancs décimétriques de biosparite crinoïdique ont un pendage régulier (bien visible sur la photo 1, Pl. I à l'extrémité gauche). La radioactivité y est normale.
- dans la zone centrale, l'allure régulière des calcaires est interrompue par une brèche de faille de couleur jaune à orangée d'environ deux mètres de large qui s'étrangle vers le bas. On y observe des mor-

(+) Les parois du piton assez verticales n'ont pas été examinées de manière systématique.

ceaux de calcaire, des blocs de grès phosphatés (photo 11, Pl.III), des calcaires en plaquettes à débris lithiques de forte taille (20 centimètres maximum) (photo 9, Pl.III), le tout emballé, soit dans un ciment plus fin fortement coloré, soit dans de la calcite de recristallisation blanche et jaune. On y observe également des hydroxydes de fer ; l'ensemble est fortement altéré.

La radioactivité est dans l'ensemble peu élevée (30-50 $\mu\text{R/h}$). A droite de cette zone complexe et derrière un petit éperon calcaire on aperçoit une brèche polygène jaune-orangé peu consolidée qui remplit une cavité d'un ou deux mètres de large sur quatre ou cinq mètres de long. Cette cavité ne montre aucune issue vers le haut ; elle entaille le calcaire à l'emporte pièce. Cette brèche est constituée d'éléments de taille centimétrique, emballés dans un ciment phosphaté brun à rouge.

Une nette anomalie, d'intensité comprise entre 80 et 100 $\mu\text{R/h}$, est liée à la présence de cette brèche.

- enfin, dans la partie Sud, les bancs calcaires retrouvent leur allure régulière et leur pendage, 10 à 20° S.

Sur la paroi située derrière la statue, le regard est attiré par une fracture verticale, d'allure légèrement sinueuse, de vingt à trente centimètres de largeur (photo 10, Pl.III). Cette fracture est remplie par des phosphorites d'aspect bréchique. En effet, on y observe de très nombreux éléments phosphatés noirs, de taille extrêmement variable (inférieur au millimètre à quelques centimètres) et de forme sub-arrondie à anguleuse.

La radioactivité y atteint des valeurs élevées de 200 à 300 $\mu\text{R/h}$. Ces mêmes phosphorites s'observent à proximité immédiate sur la plate-forme au pied de la paroi, ainsi que plus bas dans le bombement calcaire qui forme la base de l'affleurement.

De plus, tout au long de la base de l'affleurement (zone de deux à trois mètres à pente plus douce (photo 1, Pl.I), le calcaire crinoïdique est disloqué en gros blocs (dix centimètres à quelques mètres) qui apparaissent cimentés par un matériau généralement foncé très typique.

Ils s'agit manifestement d'une brèche tectonique, cette hypothèse étant étayé et par la présence de la fracture verticale remplie par des phospho-

rites, et par celle de la brèche de faille déjà décrite.

De très fortes anomalies radioactives (200 à 400 $\mu\text{R/h}$) sont toujours liées à ce ciment. La nature de ce ciment varie entre des grès (photos couleurs, 1 et 2) et calcaires à débris lithiques de phosphate et des phosphorites du même type que celles décrites dans la fracture verticale.

Les grès sont tantôt gris, tantôt beige clair (photo couleur 1). Ceux de couleur grise possède une granulométrie fine et homogène. Des grains clairs et plus foncés lui donnent un aspect tacheté. Ils s'observent principalement dans les zones centrales et faillées ainsi qu'à la base de l'affleurement. Localement ils sont bordés par des phosphorites ou encore, apparaissent en éléments brèchiques dans le grès beige.

Quant au grès de couleur beige, il est plus hétérogène, et renferme de nombreux fragments phosphatés, le plus souvent anguleux, et de taille variable (inférieure au millimètre à dix centimètres) qui sont distribués erratiquement dans la matrice gréseuse fine et homogène. Ce type de grès s'observe dans la partie de l'affleurement située au pied de la statue où il forme le ciment entre des blocs calcaires disloqués. Il apparaît quelquefois en blocs emballés dans les phosphorites.

IV.2.2. Visé

c) Carrière "L" des carrières de Richelle (Cl groupe 7)

Une description lithologique et stratigraphique complète de cette carrière sera trouvée dans les travaux de PIRLET (1967b, pp. 306-307). Rappelons ici, qu'il s'agit d'énormes masses de brèches à blocs calcaires et dolomitiques. On y trouve localement des petits éléments noirs de phosphate qui donnent à la roche un aspect tacheté des plus caractéristiques. Ces éléments ont une taille de l'ordre d'un centimètre, sont fortement dispersés et, en conséquence, ne donnent lieu qu'à de faibles anomalies radioactives (20 à 40 $\mu\text{R/h}$). Ces phosphates ont été signalés par PIRLET (1967b) dans l'ensemble f (brèche V3a) et par DE WITTE (1977) dans l'ensemble g (brèche V1 β).

IV.2.3. Vallon de Souvré

d) Affleurement "du cheval" (CK groupe 5)

Cet affleurement est formé de brèches cyclopéennes d'âge Frasnien inférieur (HORION et GOSSELET, 1892). Des blocs calcaires et dolomitiques de grande dimension (certains blocs ont des dimensions de plusieurs mètres) sont emballés dans une matrice de calcite cristalline. On y observe fréquemment des fragments phosphatés noirs anguleux, généralement allongés, de un à deux centimètres de large sur un à dix centimètres de long. (photo 12, Pl.III). Ils forment des copeaux caractéristiques, localement très abondants. L'altération, fort importante sur le côté N-W, les fait particulièrement bien apparaître (relief différentiel). Lorsque le ciment est plus abondant on devine des structures orientées (laminations) dans lesquelles les phosphates forment de minces rubans de quelques dizaines de centimètres de long. Les anomalies, peu élevées (15 à 40 μ R/h), sont liées à la présence de ces débris phosphatés. Cette radioactivité est étonnamment faible par rapport aux autres affleurements où les phosphates sont visibles, d'autant plus qu'ils occupent, ici, un volume au moins aussi important. Derrière l'écurie localisée approximativement au centre de l'affleurement, on observe une poche de dissolution d'un ou deux mètres de large remplie d'une brèche polygène jaune à orangée. Le ciment terreux constitue plus de 50 % de cette brèche où l'on distingue environ 10 % de blocs anguleux de phanériotes viséens ainsi que divers débris fortement altérés et plus petits.

IV.2.4. Dalhem

e) Affleurements de la "Ferme du Chafour" (M groupe 10)

Ces affleurements consistent en pointements calcaires discontinus et disséminés sur le flanc de la vallée. Ils sont tous formés de brèches calcaires massives dans le ciment desquelles on observe des petits éléments phosphatés. Grâce à des travaux récents d'extension de la ferme, une coupe fraîche s'offre à l'observation. Elle s'étend sur plusieurs dizaines de mètres en faisant suite aux affleurements existants. On y observe une

vaste poche de dissolution dans laquelle des phtanites (V3c, basé sur des critères lithologiques) sont descendus sans ordre. Des empilements de couches plissotées se devinent localement ; plus généralement des morceaux de phtanites de toutes grandeurs sont emballés dans une matrice argilo-sableuse. Trois gros pointements calcaires se distinguent dans cet ensemble (photo 4, Pl.II). Situés dans le bas de l'affleurement, ils montrent des formes émoussées. L'un d'eux présente une légère anomalie radioactive (30 μ R/h), celle-ci est à nouveau liée à la présence de petits éléments phosphatés dispersés dans le calcaire. Notons également, qu'au contact entre ce pointement calcaire et le remplissage karstique, l'anomalie augmente jusqu'à 50 μ R/h. Le ciment de couleur jaunâtre y est plus abondant (phosphates ?). Quant au reste du remplissage, il ne montre qu'une très faible activité (10 à 12 μ R/h, localement 20 μ R/h).

Les autres pointements localisés à quelques dizaines de mètres vers le Nord (anciennes carrières) font manifestement partie du même ensemble : le calcaire émergeant simplement plus fortement du karst. Les anomalies, ponctuelles, sont liées à la présence de petits éléments phosphatés dispersés dans le ciment de la brèche. Ils sont brun-noir, souvent en relief et leurs formes sont irrégulières (photo 13, Pl.III) et leurs dimensions rarement supérieures à quelques centimètres. Quelquefois, on les observe formant des petites traînées de dix à vingt centimètres de longueur (photo 14, Pl.III). L'intensité des anomalies liée à la présence de ces éléments, varie de l'un à l'autre, entre 40 et 150 μ R/h, et contraste immanquablement avec le calcaire (7 à 12 μ R/h).

IV.2.5. Bombaye

f) Carrière de "La Folie" (O groupe 12)

Une description complète de cette carrière sera trouvée dans les travaux de PIRLET (1967a). Il convient cependant d'ajouter que dans les brèches (VI β) à blocs anguleux de calcaire, et de dolomie (ensemble f') et dans le

conglomérat viséen (VI β) (ensembles e et e'), il existe de petits cailloux noirs phosphatés (à ne pas confondre avec des débris lithiques de schistes noirs fort semblables). Une anomalie radioactive ponctuelle leur est liée ; l'intensité se situant entre 30 et 60 μ R/h.

g) Série d'anciennes petites exploitations (R groupe 14)

L'ensemble de ces affleurements est formé d'une brèche calcaire massive et assez homogène à éléments plus ou moins anguleux et de petite taille (maximum dix centimètres). Le ciment est essentiellement formé d'éléments figurés très petits. On observe une faune abondante (Coraux, Brachiopodes, Encrines). La stratification n'est généralement pas visible. Toutefois, dans la carrière située le plus au Sud, on distingue un petit banc calcaire à structure laminée (photo 15, Pl.IV), d'épaisseur constante de trente à quarante centimètres indiquant le sens de la stratification (subhorizontale). Ce banc se retrouve à différents niveaux de la carrière, ceci témoignant de l'action d'une tectonique cassante. De nombreuses diaclases, pratiquement verticales, fracturent ces calcaires et pourraient, de prime abord, être confondues avec la stratification.

Les phosphates apparaissent toujours dans le ciment de la brèche, le plus souvent sous forme d'éléments figurés brun-noir, à contours irréguliers de quelques millimètres à un centimètre, ou plus rarement en éléments arrondis à allongés de quelques centimètres (photo 16, Pl.IV). Ils se présentent quelquefois en filonnets irréguliers continus ou discontinus, d'un à plusieurs centimètres d'épaisseur, qui se poursuivent sur quelques dizaines de centimètres (photo couleur, 3) suivant une direction parallèle à la stratification. On les observe rarement dans les diaclases, mais par contre fréquemment dans des stylolithes.

Contrairement aux affleurements d'Argenteau, Dalhem et Souvré, ces éléments phosphatés sont extrêmement difficiles à repérer, même à l'aide du scintillomètre. En effet, l'ensemble de la carrière présente une radioactivité anormale de l'ordre de 30 à 40 μ R/h et il est très rare de trouver des concentrations de phosphates donnant lieu à une augmentation ponctuelle de cette radioactivité (dans ce cas l'intensité peut atteindre 60 ou 70 μ R/h).

IV.2.6. Conclusions partielles

A ce stade du travail et en l'absence de données biostratigraphiques et pétrographiques, une seule conclusion se dégage de l'ensemble des observations de terrain : toutes les anomalies radioactives associées aux calcaires sont systématiquement dues à la présence de phosphates.

En outre, l'intensité de la radioactivité est manifestement proportionnelle au volume occupé par les phosphates. Signalons une exception à l'affleurement du Vallon de Souvré, où les intensités sont peu élevées alors que les phosphates sont abondants (cf. IV.2.3.d).

Ces phosphates, présents le plus souvent sous forme d'éléments figurés, ont une géométrie par rapport à l'enveloppe calcaire assez difficile à définir sur le terrain : tantôt apparemment concordante, tantôt franchement discordante. Il paraît prématuré d'aborder cette question à ce stade de l'étude.

Dans les carrières "L" (Richelle) et de "La Folie" (Bombaye), des éléments phosphatés ont été observés (cf. IV.2.2.c et IV.2.5.f). Mais étant donné, d'une part leurs petites dimensions et leurs fortes dispersions, et d'autre part la faible radioactivité qui leur est associée, leur étude détaillée a été jugée peu intéressante vu les buts poursuivis par ce travail.

LEGENDE de la PLANCHE I

Photo 1 :

Argenteau, C Groupe 1.

Vue d'ensemble de l'affleurement de "la statue".

Les flèches renvoient à des photos de détails :

a : photo couleur 1,

b : photo couleur 2 ; photos 9 et 11, Planche III,

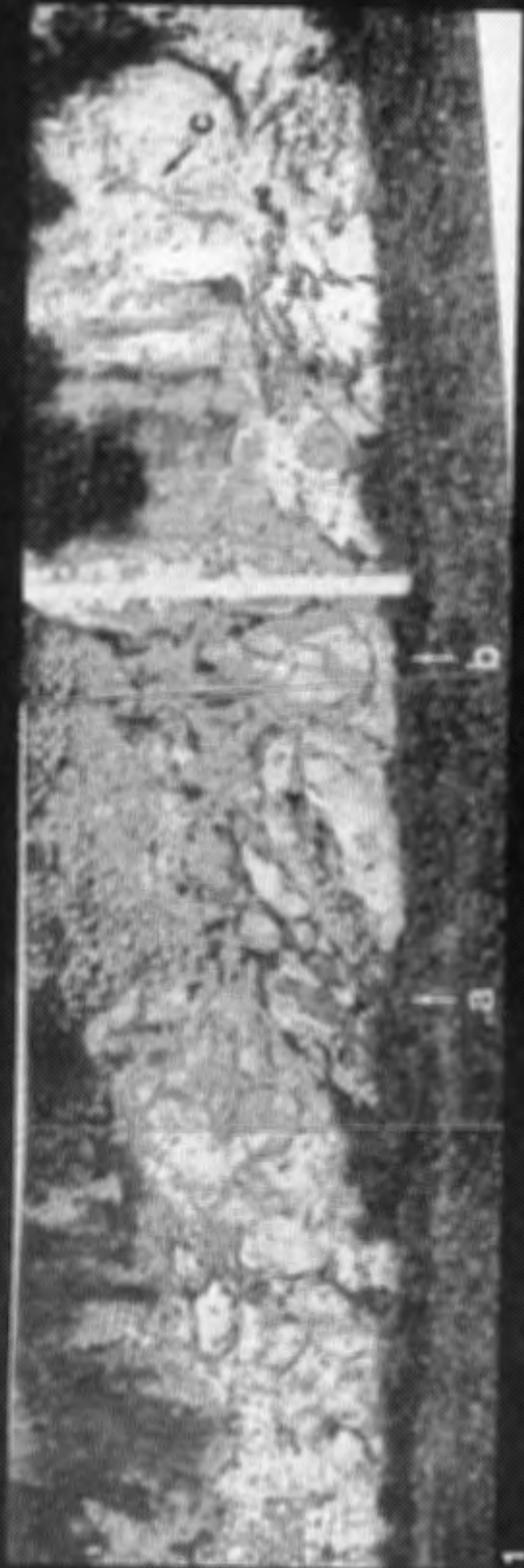
c : photo 10, planche III.

Photo 2 :

Argenteau, B groupe 2.

Vue d'ensemble d'une poche de dissolution essentiellement remplie par des shales noirs. Deux pointements calcaires s'observent à la base, les zones à plus fortes anomalies (brèches à ciment phosphaté) sont à proximité de ces pointements.

pl 1



LEGENDE de la PLANCHE II

Photo 3 :

Vallon de Souvré, Ck groupe 5.
Vue d'ensemble de l'affleurement "du cheval".

Photo 4 :

Dalhem, M groupe 10. Ferme du Chafour.
Pointement calcaire émoussé dans le fond d'une poche de dissolution remplie de phtanites.

Photo 5 :

Bombaye, R groupe 14.
Vue d'ensemble de l'anomalie de vaste étendue (en tireté) qui s'étend sur la rive droite de la Berwinne et où s'observent d'anciennes petites exploitations.

Photo 6 :

Bombaye, R groupe 14.
Vue sur une des anciennes petites exploitations de la photo 5.

Photo 7 :

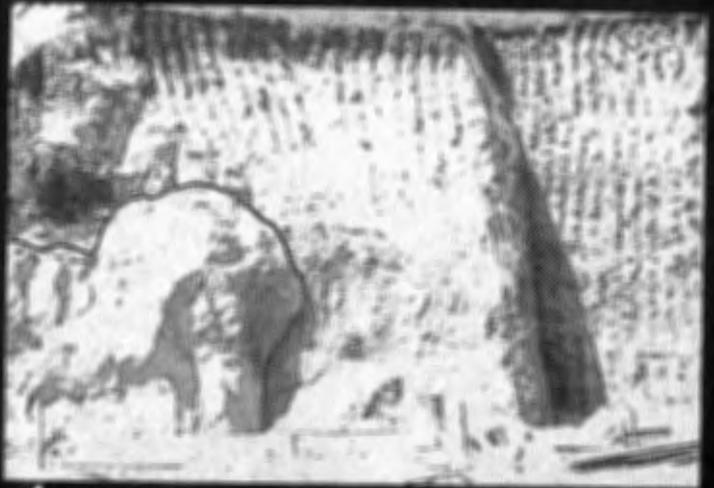
Visé, carrière "N" des carrières de Richelle, CN groupe 6.
Brèche polygène remplissant des grottes dans les calcaires.

Photo 8 :

Visé, carrière "F" des carrières de Richelle, CF groupe 8.
Vue d'ensemble de la falaise ; les flèches noires montrent la position des argilites dans le V3c inférieur.



3



4



5



6



7



8

LEGENDE de la PLANCHE III

Photo 9 :

Argenteau, affleurement de "la Statue", détail de la photo 1, zone centrale (b).
Calcaires en plaquettes à débris lithiques de grosses dimensions (un débris est bien visible dans la partie supérieure de la photo).

Photo 10 :

Argenteau, affleurement de "la Statue", détail de la photo 1, partie Sud (c).
Fracture verticale d'allure sinieuse remplie par des phosphorites d'allure bréchique.

Photo 11 :

Argenteau, affleurement de "la Statue", détail de la photo 1, zone centrale (b).
Grès (partie grise) formant le ciment des blocs de calcaire (partie claire).

Photo 12 :

Vallon de Souvré, affleurement du "cheval".
Fragments phosphatés noirs, anguleux formant des copeaux caractéristiques.
Brèche cyclopéenne frasnienne.

Photo 13 :

Dalhem, ferme du Chafour.
Petits éléments phosphatés dispersés dans le ciment de la brèche calcaire (V3b γ).

Photo 14 :

Dalhem, ferme du Chafour.
Phosphates formant des petites trainées de 10 à 20 cm de longueur. On distingue nettement les éléments de la brèche.

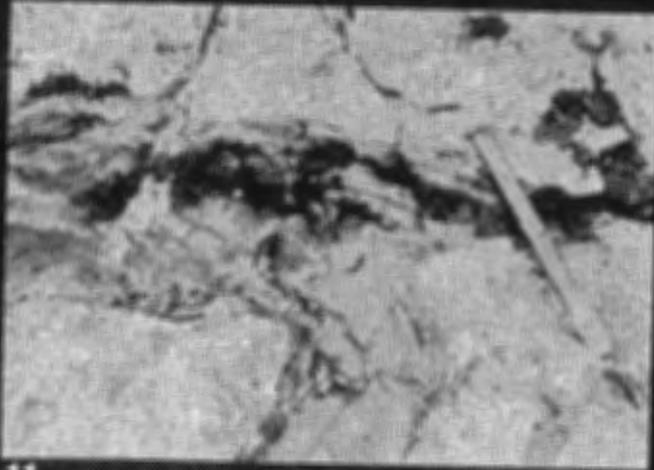
pl III



9



10



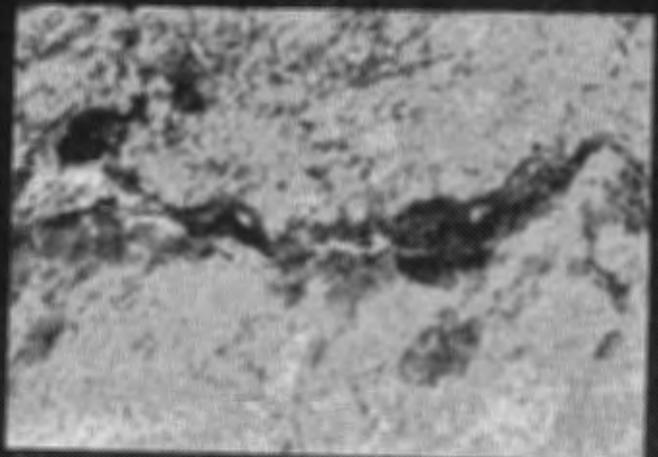
11



12



13



14

IV.3. Etudes pétrographique et biostratigraphique

Plus d'une centaine de lames minces taillées dans les échantillons de roches calcaires ont permis :

- de décrire les microfaciès des roches calcaires des principaux affleurements et en particulier ceux appartenant aux groupes C et R (non encore décrits dans la littérature),
- de donner une idée de l'âge de ces roches sur base de la micropaléontologie et des Coraux,
- d'observer les relations entre les calcaires et les phosphates.

D'autre part, les occurrences intéressantes et inusitées de grès et calcaires (dans lesquels la présence de débris lithiques phosphatés était peu visible sur le terrain), et des phosphorites, ont nécessité également une étude microscopique détaillée.

IV.3.1. Etudes pétrographique et biostratigraphique globale des calcaires

L'étude de terrain montre qu'ils sont généralement formés de brèches calcaires dont la taille des éléments varie de quelques centimètres au mètre.

A Argenteau, la brèche calcaire est constituée de débris de dimensions variables dans lesquels on reconnaît les microfaciès suivants :

- biosparudite à intraclastes,
- biomicrite à intraclastes partiellement recristallisée,
- micrite à bioclastes.

Les Foraminifères, Algues et Crinoïdes y sont abondants. Les Bryozoaires et débris coquilliers sont également présents.

Certains des débris renferment un grand nombre de Calcisphères (*C. laevis* et *pachysphaerica*). Ces débris calcaires contiennent un assemblage microfaunique indiquant un âge VI-V2 (V2a à Argenteau - KIMPE et coll., 1978) :

- Foraminifères : *Diplosphaerina inaequalis* - *Earlandia minor* - *Earlandia vulgaris* - TOURNAYELLIDAE - FORSCHIINAE - cf. *Eotextularia* - *Tetrataxis* sp. - *Endothyra* sp. - cf. *Dainella* sp.

Les débris contenant cette microfaune apparaissent dans une matrice carbonatée (biosparite) à Coraux d'âge V3by (KIMPE et coll., 1978) :

- Coraux : *Dibunophyllum* cf. *bipartitum* - *Axophyllum* sp. - *Siphonodendron* sp.

Les calcaires stratifiés qui apparaissent localement sont formés de biosparites crinoïdiques de même âge (V3by) (PIRLET et POTY, comm. pers.).

Comme les observations de terrain l'avaient déjà montré, les phosphates se localisent généralement dans les structures tectoniques (fractures, failles, brèches tectoniques, ...) et plus rarement dans les brèches.

Dans la vallée de la Berwinne, que ce soit à la "Ferme du Chafour" (rive gauche), ou dans les anciennes petites exploitations (rive droite), les brèches calcaires apparaissent macroscopiquement fort semblables à celles décrites à Argenteau. Toutefois, microscopiquement, la matrice et les éléments figurés sont le plus souvent recristallisés jusqu'à ne plus laisser apparaître que des fantômes.

La brèche est essentiellement formée de débris calcaires de dimension variable et accessoirement de débris phosphatés (< 1 %) de petite taille. Les éléments calcaires montrent les microfaciès suivants :

- micrite à bioclastes (débris de Crinoïdes et débris coquilliers),
- intrasparite à pseudo-oolithes et bioclastes. L'abondance de quartz authigènes bipyramidés est très caractéristique,
- biomicrite à grands débris de Crinoïdes et partiellement recristallisée,
- pelsparite.

Ces débris calcaires apparaissent dans une matrice carbonatée qui, localement, est phosphatée (cf. IV.3.3b pour une description détaillée).

De nombreux Coraux s'observent dans la matrice :

- Coraux : *Dibunophyllum* cf. *bipartitum* - *Clisiophyllum kayserlingi* - *Siphonodendron pauciradiale* - *Paleosmia murchisoni*,

ainsi que *Lithostrotion* et un exemplaire d'*Amplexus coralloïdes*, espèce rare et typique du Dinantien de la région de Visé (POTY, comm. pers.). Cet assemblage

macrofaunique associé à *Productus giganteus*, est typique du V3by supérieur pour la région de Visé.

Au passage signalons que *Fasciella kizilia* IVANOVA, 1973 (Algue d'affinité incertaine) a été observée très fréquemment dans les échantillons étudiés.

IV.3.2. Etude pétrographique des grès et calcaires phosphatés et des phosphorites

Dans ce paragraphe on décrira les roches inusitées : grès et calcaires à débris phosphatés, calcaires en plaquettes à gros débris, phosphorites qui s'observent à Argenteau tout au long de la base de l'affleurement "de La Statue" (cf. IV.2.1.b). Rappelons que ces roches remplissent des fractures ou cimentent les blocs calcaires d'une brèche tectonique.

L'observation microscopique permet d'y distinguer trois types lithologiques principaux : des grès à débris phosphatés, des calcaires à débris phosphatés et des phosphorites⁺.

a. Les grès à débris phosphatés

Ce sont des grès moyens à fins à ciment carbonaté et débris lithiques de phosphate et d'argile (photos couleurs, 1 et 2).

Ils sont formés de 30 à 50 % de grains de quartz bien classés, de taille comprise entre 100 et 250 μm , isométriques et anguleux ou parfois plus allongés, et à structure empatée (non jointive). On observe parfois un nou-rissage secondaire des grains de quartz.

Le ciment est constitué de calcite en grandes plages à structure poecilitique. On y observe des morceaux de calcite détritique de plus forte taille ainsi que des articles d'Encrines, malgré une recristallisation générale qui oblitère fortement les structures anciennes.

Les débris phosphatés, de couleur brun clair à brun foncé et de taille extrêmement variable (10 μm au cm), possèdent des formes très fréquemment quelconques et anguleuses (débris divers, esquilles, copeaux), souvent allongées à section elliptique (pebbles, pellets), plus rarement arrondies (ooli-

(+) Dans le sens de roche formée de plus de 50 % d'"apatite".

tes, Encrines). Leurs structures internes, très variées, seront décrites en détail en IV.3.3.a. Ils sont parfois bien classés, surtout dans les petites tailles.

Les débris argileux (kaolinite ?) sont beaucoup moins abondants et n'ont été observés que dans les grès de couleur gris-foncé. Ils sont blancs, de taille millimétrique, de forme arrondie ou en copeaux allongés. Ils constituent parfois le nucleus de pseudo-oolites phosphatés.

Notons aussi la présence de baguettes allongées et de nids de muscovite, de mouchetures et plages de pyrite parfois très abondantes et accessoirement de grains de tourmaline.

Ces grès présentent fréquemment une structure faiblement orientée qui se marque par :

- l'orientation générale des grains de quartz, particulièrement nette dans les grès à quartz allongés ;
- l'orientation des débris lithiques particulièrement nette pour ceux dont la forme est elliptique ou allongée ;
- la variation de l'abondance de la taille des débris lithiques.

La structure de ces grès est surtout conditionnée par la concentration et la taille des débris phosphatés. Tantôt ils sont peu abondants (quelques %), de taille légèrement supérieure au quartz et alors bien classés (cas des grès macroscopiquement gris), tantôt ils deviennent nettement plus abondants (10-20%) de plus grande dimension et sont alors mal classés (cas des grès macroscopiquement plus clairs). Toutefois, la concentration en éléments phosphatés varie fortement à l'échelle de l'échantillon, particulièrement pour les tailles élevées.

Plus rarement, le grès se charge en argiles qui soulignent le litage, la diagenèse y est plus poussée (nourrissage des quartz) et la pyrite nettement plus abondante.

b. Calcaires à débris phosphatés

Dans la majorité des cas il s'agit de calcirudites ou de biosparites à Encrines et à débris lithiques de phosphates et de calcaires.

Ils sont formés de 1 à 40 % de débris lithiques emballés soit dans un ciment sparitique grossier soit dans un ciment formé de débris d'Encrînes.

La recristallisation est fréquemment complète. Quelques grains de quartz isométriques et de taille comprise entre 100 et 200 μm s'observent dans le ciment. Les débris phosphatés ont des structures identiques à celles déjà décrites dans les grès, mais ils sont ici, mal classés et particulièrement grands (mm au cm). Les débris anguleux semblent nettement plus abondants que les éléments arrondis.

Les débris calcaires, formés de calcarénites, sont nettement moins abondants (quelques %), souvent de forte dimension, également mal classés et anguleux. Certains sont parfois partiellement phosphatisés.

De nombreux joints stylolithiques, dans lesquels se concentre la pyrite, sont disposés irrégulièrement. La pyrite est, par ailleurs, assez abondante en mouchetures et plages dans la sparite.

c. Les phosphorites

Ces phosphorites sont constituées de 50 à 80 % d'éléments phosphatés emballés dans un ciment sparitique où s'observent quelques plages de quartz détritique. Elles sont assez souvent écrasées, laminées, ce qui oblitère la structure d'origine.

Les débris phosphatés présentent toutes les dimensions, depuis quelques dizaines de microns jusqu'à plusieurs centimètres. Les gros morceaux sont particulièrement abondants, soit sous forme de débris irréguliers et anguleux, soit sous forme de galets elliptiques à contours irréguliers. La structure bréchiqve visible à l'affleurement est due à ces débris. Leurs structures, très variées, seront décrites en IV.3.3.a.

Le quartz, de forme isométrique et de taille constante (100-200 μm), montre souvent des extinctions roulantes. Son abondance varie fortement.

Ces phosphorites correspondent à celles décrites dans la littérature anglo-saxonne sous le nom de "pebble phosphate".

IV.3.3. Description microscopique détaillée des phosphates

Etant donné d'une part, le caractère peu commun des occurrences phosphatées dans les calcaires V3by de la région de Visé et, d'autre part, le rôle bien connu joué par les phosphorites dans la géochimie de l'uranium (GOLDSCHMIDT, 1954 ; ALTSCHULLER et coll., 1958), une étude microscopique détaillée de ces phosphates s'impose. Cette description paraît d'autant plus nécessaire que ces occurrences n'ont jamais été ni signalées, ni décrites dans la littérature régionale.

a. Les éléments phosphatés

Que ce soit dans les brèches calcaires, dans les calcaires et grès phosphatés ou dans les phosphorites, les éléments de phosphate présentent toujours des structures très semblables, raison pour laquelle ils seront décrits globalement.

L'ensemble des caractères optiques de ces éléments montre qu'il s'agit dans tous les cas de la variété de phosphate de chaux dénommée colophanite⁺ par les pétrographes. Cette colophanite couvre une gamme de couleurs allant du brun clair au noir, la coloration de chacun des individus étant assez homogène. Entre nicols croisés elle paraît le plus souvent amorphe. Si dans leur ensemble ces débris phosphatés présentent un aspect semblable, dans le détail ils montrent une très grande variété de structures (photos 17 à 20, Pl.IV).

On distingue dans l'ordre d'abondance décroissant :

1. des phosphoclastes

Ce sont les éléments qui résultent de la fragmentation de phosphorites pré-existantes ou du remplacement d'intraclastes calcaires (KNOX, 1978). Deux types se distinguent en fonction de l'homogénéité de leur structure interne.

Le premier type, de loin le plus abondant, est constitué de débris phosphatés de toutes formes et tailles (depuis la centaine de μm jusqu'à quelques cm) renfermant des inclusions de nature diverse, en grande quantité (photo 20, Pl.IV). On y distingue :

(+) Terme purement descriptif désignant la variété cryptocristalline des minéraux apatitiques (SLANSKY, 1964 ; KNOX, 1978).

- des débris coquilliers divers : les Bivalves et les Ostracodes sont abondants, les Brachiopodes plus rares et les Foraminifères très rares.
- des plages de calcite : qui occupent souvent un volume important. Notons de fréquentes veinules de calcite secondaire.
- des cristaux de quartz : qui se présentent souvent sous forme de petites plages isolées ou engrenées par 2 ou 3, ou encore en sphérolites de 10-20 μm dispersés dans la colophanite.
De nombreux phosphoclastes, très caractéristiques, sont criblés d'innombrables cristaux de quartz automorphes. Les sections de prisme, assez trapues et plus ou moins bien formées ont des tailles constantes au sein d'un même individu, mais très variables de l'un à l'autre. Les dimensions extrêmes vont de 30 à 300 μm pour la longueur et de 10 à 100 μm pour la largeur. La densité de ces inclusions est inversement proportionnelle à leur taille. Il s'agit clairement de quartz authigènes formés lors de la diagenèse des boues phosphatées. Accessoirement le quartz s'observe en remplissage de coquilles ou d'oolites.
- des cristaux de fluorine : remplacent localement la colophanite.

Le second type est également constitué de débris de toutes formes et tailles mais ne renferme aucune inclusion. Les phosphoclastes de ce type sont généralement de couleur et de structure homogène. Certains montrent parfois une fine bordure plus sombre, d'autres sont affectés par un réseau de cassures en treillis (traces de dessiccation ?).

2. des pellets

Terme utilisé au sens de Mc Kelvey (in : ALTSCHULLER, 1958) pour désigner les particules phosphatées de forme ovoïde (photo 19 et 20, Pl.IV). Leurs structures internes sont identiques à celles des phosphoclastes du premier type.

3. des oolites et pseudo-oolites

Il s'agit presque toujours de pseudo-oolites à cortex irréguliers. Le cortex montre souvent une structure concentrique soulignée par des différences de

pigmentation. Le nucleus est fréquemment constitué de débris d'Echinodermes parfois phosphatisés, plus rarement par d'autres débris d'organismes par des grains de phosphate ou de quartz. Ces pseudo-oolites sont sphériques à ellipsoïdaux et de taille submillimétrique (0,2 - 0,5 mm).

4. des débris d'organismes à test calcaire

Il s'agit principalement de Gastéropodes et de débris d'Echinodermes (photo 19, Pl. IV). Ces derniers montrent souvent une phosphatisation graduelle, depuis l'imprégnation de pores jusqu'au remplacement total, les inclusions de calcite soulignant les structures originelles. Les autres débris sont peu abondants.

L'absence de débris d'organismes phosphatés (os, dents, écailles, arêtes) doit être mentionnée. Il en est de même en ce qui concerne la glauconie, minéral souvent associé aux phosphorites.

Dans les brèches calcaires on n'observe que des phosphoclastes généralement anguleux et assez homogènes.

b. Le ciment phosphaté

Si le phosphate s'observe uniquement sous forme de débris lithiques dans les calcaires et grès phosphatés ainsi que dans les phosphorites, il n'est, par contre, pas rare de le rencontrer également sous forme de ciment dans les brèches calcaires de Bombaye.

Le ciment phosphaté se développe dans la matrice de la brèche calcaire souvent à proximité de débris lithiques de phosphate ; le plus souvent très ténu il ne se voit que grâce à sa légère coloration brune. Il commence par se développer en réticulations discrètes le long des joints de grain et autres zones de faiblesse, puis remplace progressivement le ciment carbonaté. Dans de rares cas, il finit par empâter les petits éléments de la brèche. Dans d'autres cas, le phosphate paraît envahir préférentiellement le ciment de certains petits débris calcaires mais il n'y a aucune preuve de phosphatisation in situ.

Cette phosphatisation est très locale (quelques mm² à cm²) et s'observe le plus souvent au stade de la réticulation. Elle est vraisemblablement responsable de

l'anomalie radioactive de faible intensité, mais de vaste étendue, qui se manifeste à Bombay sur tout un flanc de la Berwinne (cf. IV. 1.6.h).

Les stylolithes des brèches calcaires à éléments phosphatés (photo 18, Pl. IV) sont toujours soulignés par des amas ou fins liserés de phosphates associés à la pyrite. C'est particulièrement caractéristique des calcaires V3by de la vallée de la Berwinne.

IV. 4. Conclusions et synthèse

Au terme des études lithologiques (cf. IV.2), pétrographiques et biostratigraphiques (cf. IV.3) détaillées des anomalies radioactives liées aux calcaires, un effort de synthèse s'impose.

Dans le tableau III sont rassemblées de manière synthétique les principales déductions qui découlent de ces études pour chacune des principales anomalies radioactives.

L'examen de ce tableau permet d'avancer trois conclusions :

1. Toutes les anomalies radioactives associées aux calcaires sont systématiquement dues à la présence de phosphates.

Ces phosphates constituent toujours des débris lithiques de taille très variée, que ce soit dans les brèches calcaires (cf. IV.3.1), dans les grès (cf. IV.3.2.a), dans les calcirudites ou biosparites à Encrines (cf. IV.3.2.b) ou dans les phosphorites (IV.3.2.c). Toutefois, à Bombay, les phosphates forment parfois le ciment de la brèche (IV. 3.3.b) ce qui implique que les conditions nécessaires à la genèse des phosphates existaient dans le bassin, tout au moins localement.

2. Dans la majorité des cas, la nature lithologique des roches encaissantes consiste en brèches calcaires.

L'affleurement de "La Statue" en est la seule exception ; il est formé de calcaires crinoïdiques bien stratifiés (IV.2.1b et IV.3.1).

3. La plupart de ces brèches calcaires ainsi que le calcaire crinoïdique appartiennent au V3by.

Les brèches calcaires des carrières "L" et de "La Folie" appartiennent res-

pectivement au V1 β , V3a et V1 β . Toutefois, les anomalies qui leurs sont associées ne présentent qu'un intérêt mineur (IV.2.2c et IV.2.5.f).

L'affleurement du Vallon de Souvré semble faire exception avec un âge Frasnien (IV.2.3.d).

TABLEAU III : Synthèse des études géologiques

<u>Site</u>	<u>nature de l'anomalie radioactive</u>	<u>roche encaissante</u>	<u>âge</u>	<u>Relations géométriques entre les phosphates et leur encaissant calcaire</u>
<u>Argenteau</u> Piton rocheux (IV.2.1.a)	phosphorites et éléments phosphatés	brèches calcaires localement calc. crinoïdiques bien stratifiés	V3by	généralement discordant (fractures, fissures, joints) parfois concordant
<u>Argenteau</u> La Statue (IV.2.1.b)	grès et calcaires à débris phosphatés. phosphorites	calcaires crinoïdiques bien stratifiés	V3by	discordant (brèche tectonique) fracture
<u>Dalhem</u> Chafour (IV.2.4.c)	éléments phosphatés	brèches calcaires	V3by	concordant (élément de la brèche)
<u>Bombaye</u> petites exploitations (IV.2.5.g)	éléments phosphatés et ciment	brèches calcaires	V3by	concordant (élément et ciment de la brèche)
<u>Visé</u> carrière L (IV.2.2.c)	rare éléments phosphatés	brèche calcaires	V3a V1 β	concordant (non étudié pétrographiquement)
<u>Bombaye</u> La folie (IV.2.5.f)	éléments phosphatés	brèches et conglomérats calcaires et dolomitiques	V1 β	concordant (élément de la brèche)
<u>Souvré</u> cheval (IV.2.3.d)	éléments phosphatés	brèches cyclopéennes	F inf.	concordant (élément de la brèche)

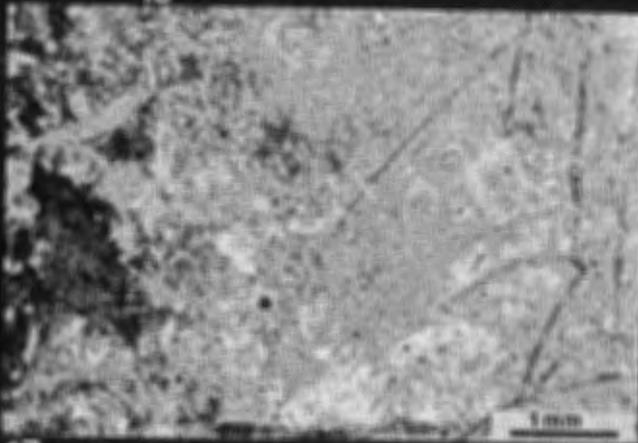
PI IV



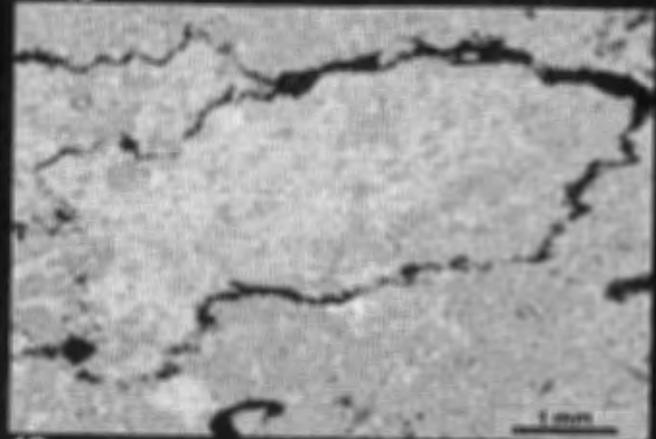
15



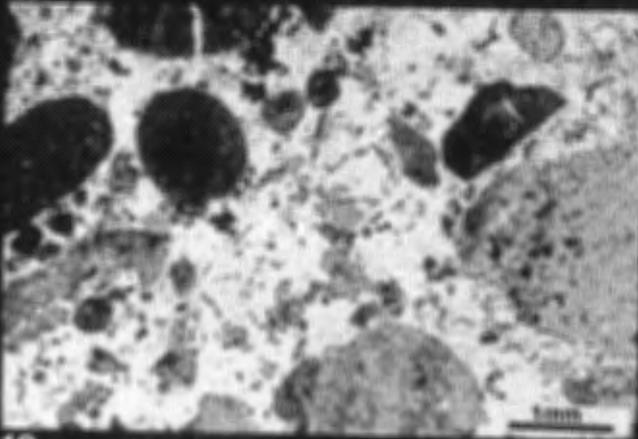
16



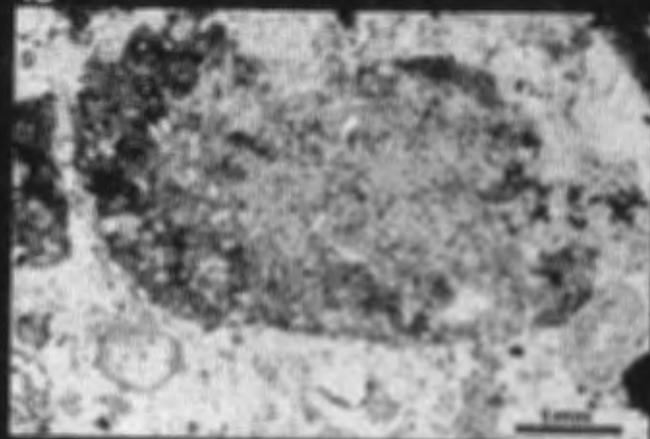
17



18



19



20

V. ETUDE DES ANOMALIES RADIOACTIVES ASSOCIEES AUX BRECHES POLYGE- NES EN REMPLISSAGE DE POCHEs DE DISSOLUTION

V.1. Localisation géographique et description lithologique et stratigraphique Distribution de la radioactivité

V.1.1. Argenteau

a) Affleurement de "La Statue" (C groupe 1)

La brèche polygène jaune-orangé, peu consolidée, qui s'observe vers le milieu de cet affleurement a déjà été décrite en IV.2.1.b.

b) le "site d'Argenteau" (LEGRAND, 1956 ; 1958) (B groupe 2)

Il est localisé à 350 m au Sud et 175 m à l'Ouest du clocher de Richelle, le long du méandre le plus élevé d'une route sinueuse qui descend de Richelle vers le Tourne-Bride. Une vaste prairie à relief karstique située juste en amont appartient également à ce site.

LEGRAND (1958) donne la description suivante de l'affleurement :

"On y voit une paroi calcaire, dont le sommet corrodé est localement pyriteux, surmontée des matériaux divers propres aux poches de dissolution, le tout étant couronné naguère par des schistes houillers fossilifères, en bancs continus."

Une très forte anomalie (350 à 400 $\mu\text{R/h}$) est liée aux terres jaunes surmontant une croute limoniteuse qui constitue le fond de cette poche. Des minéraux d'uranium secondaires (Autunite et Méta-autunite I, Torbernite et Méta-torbernite I, VAN TASSEL, 1959a) y ont été décrits. Les shales namuriens très noirs, qui surmontent les terres jaunes à autunite, sont également radioactifs, mais plus faiblement (40-60 $\mu\text{R/h}$).

D'autres anomalies assez faibles (~ 50 $\mu\text{R/h}$) s'observent aux alentours, particulièrement dans la prairie à relief karstique et le long de la route du même côté en remontant.

Le long de cette même route, une cinquantaine de mètres en contrebas et

dans la même ligne de pente, des travaux récents d'élargissement de la route ont entaillé une large poche de dissolution. La coupe, longue d'une cinquantaine de mètres sur 3 à 5 mètres de haut (photo 2, Pl. I), montre à sa base trois pointements calcaires surmontés par un empilement de shales noirs vraisemblablement namuriens. Localement et plus particulièrement à proximité des pointements calcaires, on observe des brèches polygènes et polychromes bien consolidées. Fraîche, cette brèche présente une couleur grise à taches noires et jaunes, altérée, elle devient brun-rouge à nuances vertes et jaunes. Elle est constituée d'une mouture assez fine de débris rocheux (les plus gros atteignent quelques cm), emballés dans un ciment formé en partie de gypse en lamelles bien visibles et en partie d'un matériel plus fin macroscopiquement non reconnaissable mais fort vraisemblablement phosphaté.

Les shales qui constituent la majeure partie des remplissages, se présentent tantôt en paquets de strates à peine dérangées et peu altérées (partie droite de l'affleurement), tantôt en paquets totalement disloqués où l'on distingue avec peine la stratification originelle ou encore en masses schisteuses très fortement altérées (partie centrale de couleur très noirs).

Les pointements calcaires de forme émoussée, présentent une structure massive et sont formées d'une intramicroparite à rares bioclastes. On y observe quelques rares éléments noirs phosphatés ainsi que des phosphates dans les stylolithes.

En ce qui concerne la radioactivité, les calcaires sont faiblement actifs de même que certains shales (20 - 40 $\mu\text{R/h}$) et les brèches consolidées présentent de très fortes activités (200 - 400 $\mu\text{R/h}$). On pourra remarquer sur le schéma de la figure 8⁺ que la radioactivité ne semble pas distribuée au hasard, les zones fortement actives se situant de part et d'autre des pointements calcaires. Le maximum de radioactivité n'est d'ailleurs pas au contact immédiat mais à 1 ou 2 m de distance.

(+) Voir Pl I, photo 2.

V.1.2. Richelle

c) le "site de Richelle" (LEGRAND, 1956 ; 1958) (E groupe 3)

Ce site est situé au sommet de l'escarpement de Richelle (bord de Meuse) et localisé à 200 m au Nord du clocher de Richelle. On y accède en se dirigeant vers une carrière abandonnée (carrière N de PIRLET, 1967b), que l'on laisse à gauche, pour emprunter un petit sentier à travers bois menant au pied d'une petite falaise calcaire (Frasnien). L'affleurement est situé sur le flanc Sud de cette falaise à quelques mètres sous son sommet. L'affleurement est actuellement fort dégradé.

En 1956, LEGRAND y avait fait les observations suivantes :

"Le maximum (de radioactivité) est relevé dans une masse cohérente jaunâtre épaisse de 20 à 30 centimètres, sous des brèches phtaniteuses limonitisées et silicifiées, et au-dessus d'un calcaire corrodé et silicifié".

C'est dans cette masse jaunâtre qu'à été identifiée l'association autunite-torbernite (JEDWAB, 1958 ; VAN TASSEL, 1959a). Signalons accessoirement qu'une trentaine d'espèces minéralogiques ont été inventoriées dans les roches silicifiées associées à ces karsts. (VAN TASSEL 1959a et b ; FRANSOLETT et coll., 1974 a, b, c, d). La radioactivité y atteint des valeurs comprises entre 100 et 150 μ R/h.

V.1.3. Dalhem

d) Affleurements de la "Ferme du Chafour" (M groupe 10)

Le remplissage karstique formé de morceaux de phtanites de toutes grandeurs emballés dans une matière-sableuse a déjà été décrit en IV. 2.4.f.

V.1.4. Visé

e) Carrière "N" des carrières de Richelle (PIRLET, 1967b) (CN groupe 6)

Il s'agit d'une ancienne carrière entaillant le Frasnien, renommée par sa minéralisation en bornite et chalcopryrite. On y observe de nombreux phé-

nomènes karstiques se manifestant dans la falaise calcaire par des petites grottes communiquant avec la poche de dissolution principale (photo 7, Pl.II). Les brèches de remplissage assez grossières sont le plus souvent de couleur orangée, très hétérogènes, assez meubles, renfermant de nombreux fragments de schistes argileux violets ou roses et des phtanites (taille inférieure à 10 cm). La radioactivité qui leur est liée est de l'ordre de 40 à 60 $\mu\text{R}/\text{h}$.

Au front Sud de cette carrière, on aperçoit une petite poche de dissolution dans laquelle on trouve, directement au contact du calcaire et s'étendant sur une soixantaine de cm, une brèche peu consolidée, à petits fragments divers de 2-3 cm (schistes argileux, ...), dans un ciment orangé (photo couleur, 4). Cette brèche manifeste une forte activité (200 à 250 $\mu\text{R}/\text{h}$). Ensuite, cette brèche orangée passe rapidement à une autre brèche, à fragments grossiers et abondants (petits blocs de phtanites noirs de quelques cm, à cassure conchoïdale et bords tranchants dans un ciment gris. L'activité n'y prend plus que des valeurs comprises entre 100 et 200 $\mu\text{R}/\text{h}$ au maximum.

V.1.5. Berneau

f) la ferme du Longchamp (P groupe 13)

Il s'agit d'un petit chemin creux montant à flanc de coteau qui débute à mi-chemin sur la route menant à la ferme du Longchamp . On observe dans le talus gauche de ce chemin un petit niveau bréchique ver-sicolore, dans lequel on note la présence de petits fragments bruns et noirs. Notons également que des pointements calcaires (d'âge V3) affleurent dans le chemin lui-même ainsi que dans les prairies avoisinantes. L'anomalie radioactive, peu élevée (40 $\mu\text{R}/\text{h}$) est limitée à ce niveau.

V. 2. Conclusions

Dans les brèches de remplissage de poches de dissolution la radioactivité est manifestement proportionnelle à l'abondance du ciment phosphaté. On distingue cependant deux types de remplissage suivant l'abondance relative du ciment phosphaté et des fragments rocheux.

Le premier type est constitué de véritables brèches de dissolution à ciment phosphaté abondant - de couleur grise à l'état réduit, jaune-orangé à l'état oxydé - et débris rocheux de taille centimétrique à décimétrique. Il semble se situer exclusivement à proximité immédiate des calcaires formant le fond ou la bordure des karsts. L'autunite et la torbernite s'observent uniquement dans ces brèches ; on y observe parfois aussi du gypse.

Le second type est constitué de brèches d'effondrement dans lesquelles la proportion de ciment varie fortement. Les phosphates semblent subordonnés. Leur structure est extrêmement variée : depuis des empilements de couches à peine dérangées (pas de ciment) jusqu'à un mélange confus constitué de débris de roches de toutes tailles emballés dans une matrice plus fine. Les débris sont essentiellement formés de shales namuriens et de phtanites viséens ou namuriens.

Les poches de dissolution sont surtout comblées par les brèches du second type.

VI. ETUDE DES ANOMALIES RADIOACTIVES LIEES AUX ARGILITES NOIRES

DU VISEEN SUPERIEUR

VI.1. Localisation géographique et description lithologique et stratigraphique Distribution de la radioactivité

Les argilites noires, faisant l'objet de ce chapitre, consistent en trois niveaux de 10 à 30 cm d'épaisseur localisés à la base et au sommet du V3c inférieur dans la carrière "F" de Richelle (PIRLET, 1967b) (photo 8, Pl.II). Ces intercalations contrastent par rapport à la sédimentation essentiellement carbonatée (figure 9). Ces niveaux sont biseautés vers le Sud par les dolomies qui les surmontent.

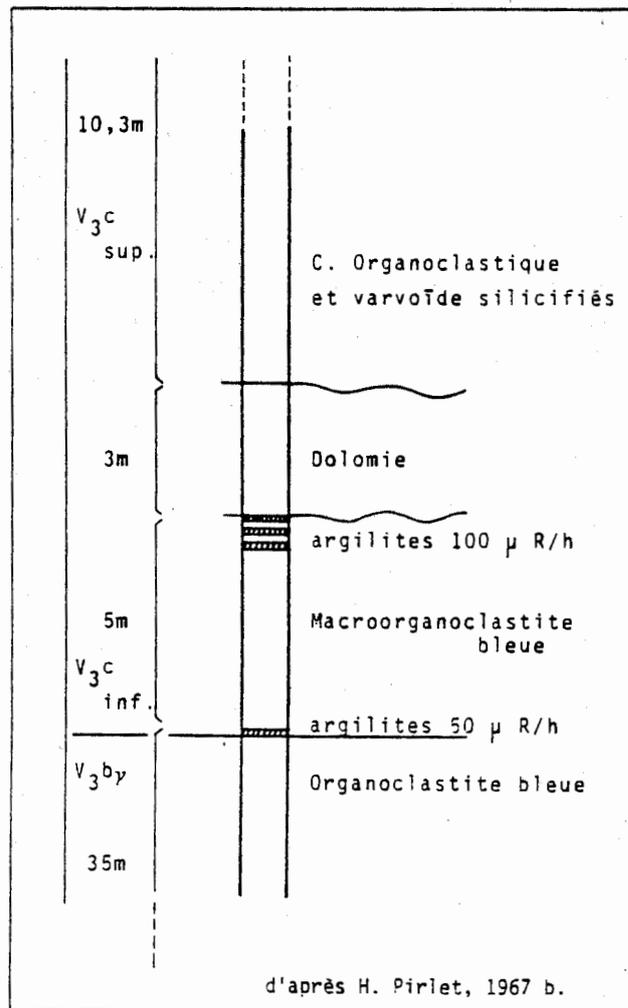


Figure 9 - Position stratigraphique des argilites.

Les niveaux supérieurs sont constitués d'argilites noires présentant des altérations polychromes jaunes à oranges⁺. Ces dernières sont particulièrement abondantes au contact avec le calcaire sous-jacent.

La radioactivité, qui est de 12 à 15 $\mu\text{R/h}$ sur le calcaire, croît rapidement sur quelques cm pour atteindre un maximum de 100 $\mu\text{R/h}$ 20 à 25 cm plus haut, puis décroît rapidement dans les dolomies supérieures.

Le niveau d'argilite inférieur est plus mince et d'aspect plus noir et plus massif, il présente une radioactivité de l'ordre de 50 $\mu\text{R/h}$.

VI.2. Conclusions

Il s'agit d'une anomalie stratiforme liée à trois minces niveaux argileux du V3c inférieur. Cette anomalie, qui n'a jamais été signalée, ne s'observe qu'à Visé et il est exclu de la retrouver dans la partie Sud du Massif où le sommet du Viséen est partout absent.

Rien ne permet, à ce stade de l'étude, d'expliquer la cause de la radioactivité.

(+) Ces argilites sont fortement altérées, vu leur situation au milieu d'une falaise il n'a pas été possible de mieux les échantillonner.

LEGENDE

Photo 1 :

Surfaces polies.

A gauche, échantillon de grès gris foncé (Ech. A/C 33) à débris lithiques de phosphate (grains foncés) de petite taille et bien classés.

A droite, échantillon de grès gris clair (Ech. A/C 31) à débris lithiques de phosphate (en noir) de plus grosse taille et mal classés.

Photo 2 :

Surface polie. Ech. A/C 37.

Grès gris clair à débris lithiques de phosphate très mal classés. Leurs dimensions varient de moins d'un millimètre (à gauche, ainsi qu'au centre) à plusieurs centimètres (à droite).

Photo 3 :

Bombaye, série d'anciennes petites exploitations. (R groupe 14).

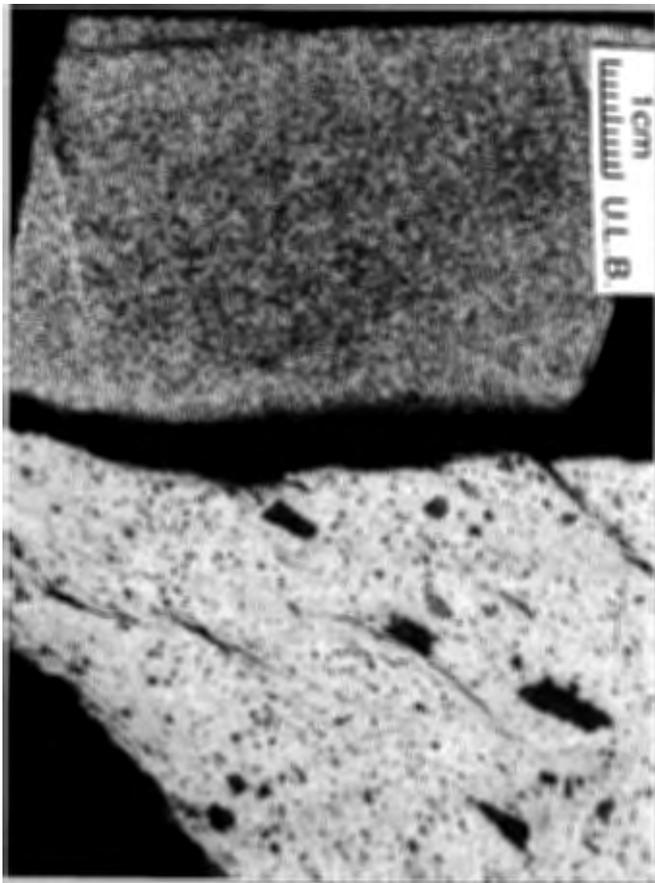
Brèche calcaire V3by ; dans le haut de la photo phosphates en filaments irréguliers se poursuivant sur une vingtaine de centimètres suivant la stratification. A droite et sous la pièce de monnaie, phosphates en petits éléments figurés à contours irréguliers.

Par suite d'une erreur à la photogravure, cette photo à été renversée et le haut se trouve sur le coté gauche.

Photo 4 :

Extrémité Sud de la carrière "N" des carrières de Richelle. (CN, groupe 6).

Poches de dissolution à remplissage brèchique orangé (en contact avec le calcaire) et gris à nombreux fragments de phtanites.



1



2

3



4



VII. ETUDE GEOCHIMIQUE ET MINERALOGIQUE

L'analyse quantitative de l'uranium s'impose pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, la radioactivité mesurée au scintillomètre sur le terrain ne donne qu'une idée approximative des teneurs réelles en uranium (influence du Th, du K ; déséquilibres radioactifs dans la famille de l'U). Ensuite, les études de terrain ayant clairement montré, et dans les calcaires (cf. IV.4) et dans les brèches (cf. V.2), que la présence de l'uranium est systématiquement liée à celle des phosphates, il paraît nécessaire de le démontrer. Une première manière consiste à analyser la corrélation qui existe entre les teneurs en uranium et phosphore, une seconde, plus directe, est d'étudier la distribution microscopique de l'uranium par autoradiographie.

L'étude minéralogique des phosphates s'impose également de manière à caractériser chimiquement l'apatite qui appartient à un groupe de minéraux forts complexes.

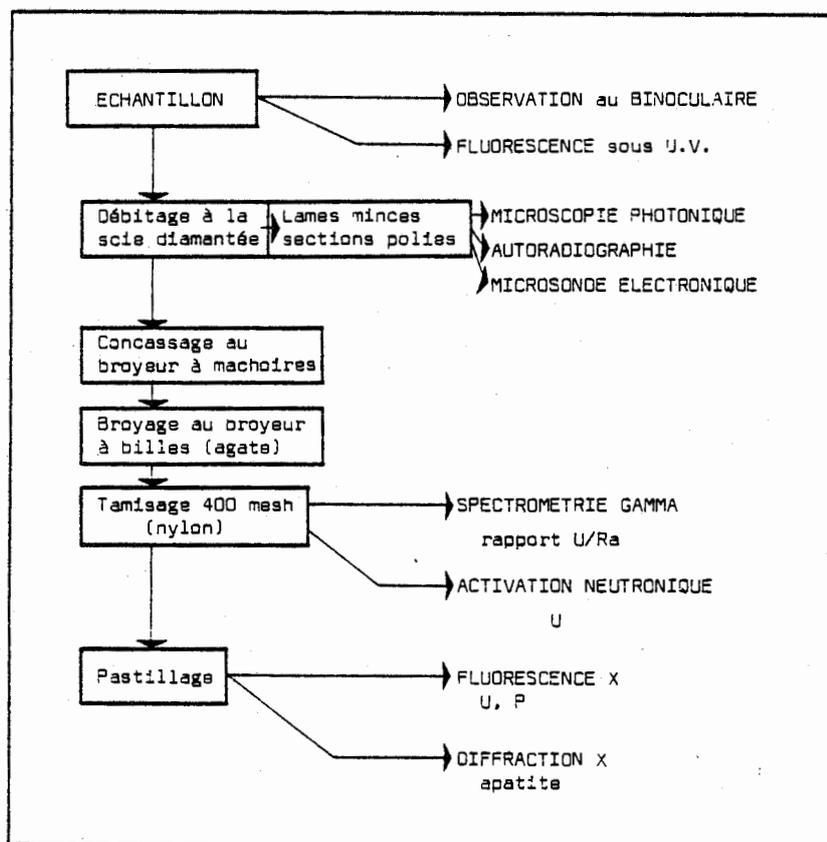


Figure 10 : schéma des opérations analytiques.

VII. 1. Les moyens analytiques

Les diverses opérations et analyses effectuées sur les échantillons représentatifs de toutes les anomalies détectées sont représentées schématiquement à la figure 10.

VII.1.1. Analyse quantitative de l'uranium par activation neutronique

La majeure partie des analyses d'U a été effectuée par activation neutronique et comptage des neutrons retardés au Centre de Harwell de l'Atomic Energy Research Establishment (Royaume Uni). Tous les détails concernant la technique utilisée à Harwell peuvent être trouvés dans l'article de OSTLE, COLEMAN et BALL (1972).

Rappelons que cette méthode est spécifique pour l'U (très faible interférence du Th) et indépendante de tout effet de matrice.

Les analyses ont été effectuées sur une partie aliquote d'1 g de poudre. La déviation standard relative sur une mesure unique est de l'ordre de 2,5 % au niveau de 50 ppm. La précision a été vérifiée par les auteurs précités, mais uniquement pour des teneurs de l'ordre de quelques ppm.

VII. 1.2. Analyse quantitative de l'uranium par spectrofluorescence de rayons X

Les travaux récents de JAMES et HATAWAY (1976) et de JAMES (1977) ont montré la possibilité de doser l'U jusqu'au niveau du ppm par spectrofluorescence de rayons X. La facilité de mise en oeuvre et la rapidité de cette technique ainsi que la disponibilité d'un appareillage de fluo-X de conception très récente⁺, ont incité à la mise au point d'une méthode originale d'analyse quantitative de l'U en traces.

a. Mise au point des conditions expérimentales

Vu la nécessité impérative d'obtenir une limite de détection aussi basse que possible (les teneurs moyennes de l'écorce terrestre étant de l'ordre de quelques ppm) les conditions expérimentales ont retenu le maximum d'attention.

(+) Spectromètre alpha 2020 automatisé de marque C.G.R.

Comme les travaux précités l'avaient déjà montré, le meilleur compromis entre sensibilité et dispersion consiste à utiliser une anticathode de Mo et un cristal LiF 220. L'analyse s'effectue sur poudre crue pastillée (HERBOSCH, 1975) avec la raie $U L_{\alpha}$.

Le fond continu décroissant linéairement (démontré expérimentalement), deux mesures du fond continu sont absolument nécessaires de manière à calculer ce dernier sous le pic, par interpolation linéaire. La présence, dans les environs du pic $U L_{\alpha}$ de nombreux pics intenses (fig. 11), rend le choix de ces zones de mesure du fond continu très délicat. En les prenant respectivement à $36^{\circ}60$ (2θ) et $38^{\circ}60$ (2θ) les risques d'interférences sont très réduits, seules des teneurs supérieures à plusieurs milliers de ppm (géochimiquement peu vraisemblable) en Sr, Rb et Th pourraient poser des problèmes.

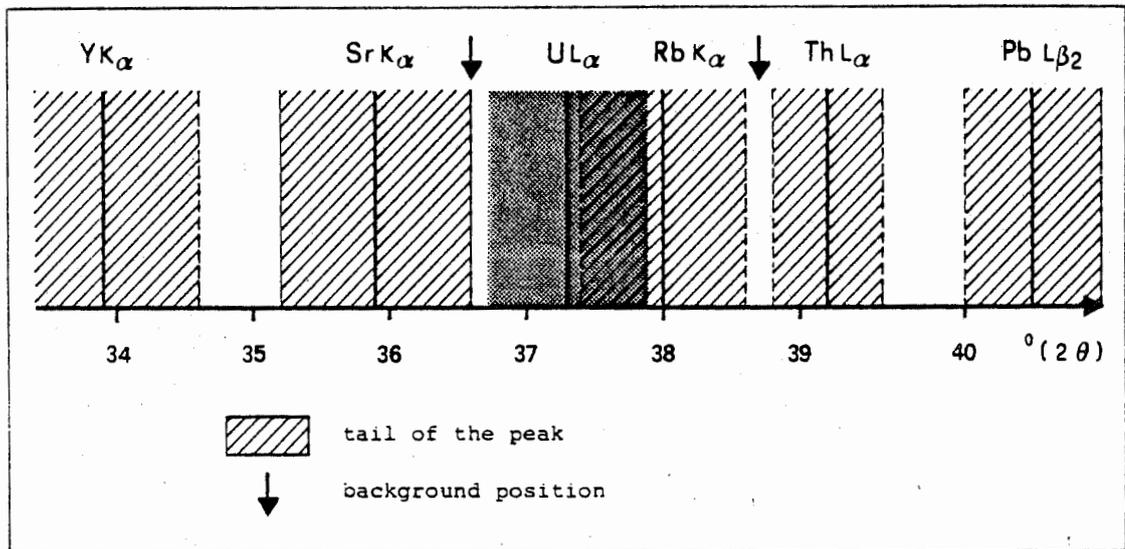


Figure 11 - Choix des zones de fond continu.

Les effets de matrice sont corrigés par la mesure du pic Compton du Mo (REYNOLDS, 1963, 1967), méthode dont des travaux récents ont montré la grande fiabilité (NESBITT et coll., 1976).

La droite analytique est établie à partir d'étalons synthétiques préparés en dopant une matrice de quartz⁺ avec un oxyde d'U⁺. Elle est rigoureusement linéaire dans l'intervalle 0-1000 ppm.

Dans les conditions expérimentales reprises au tableau IV et pour des temps de comptage de 50 secondes, pris respectivement sur le pic, les deux fonds continus et le Compton, la limite de détection théorique est de 1,4 ppm ce qui est excellent. Il s'agit d'une approche théorique aussi, compte tenu des difficultés d'estimation des fonds continus exacts, des approximations dans la correction des effets de matrice, etc..., une limite de détection pratique de 5 ppm paraît plus raisonnable. Celle-ci pourrait d'ailleurs être abaissée par des temps de comptage plus long.

TABLEAU IV : Conditions expérimentales d'analyse de l'uranium par Fluo-X

Anticathode	Mo	60 Kv	40 mA
Cristal	LiF	220	
Collimateur	fin		
Détecteur	scintillateur avec discrimination		
Raies analytiques	U L α	37°20 (2 θ)	
	fonds continus	36°60 et 38°60 (2 θ)	
	Compton Mo	30°30 (2 θ)	
Standards	quartz dopé en U		
Droite analytique	pen	m=3.9 c.p.s. / ppm	
	fond continu Rb	= 532 c.p.s.	
	temps de comptage	t= 50 sec.	
Limite de détection théorique (au niveau de confiance de 95%).	$\frac{2\sqrt{2}}{m} \cdot \sqrt{\frac{Rb}{T}} = 1.4 \text{ ppm}$ où T = temps total de comptage.		

(+) Quartz p.a. Merck. Oxyde d'U (IV) nucléairement pur (céramique) Merck.

b. Précision

La précision de la méthode n'a pu être établie de manière rigoureuse vu l'absence de standards internationaux à teneur en U supérieure à 5 ppm. Vu cette lacune, la comparaison des résultats obtenus par fluo-X avec ceux obtenus par activation s'avère la seule possibilité immédiate du contrôle de la précision. Le graphique de la figure 11, où une telle comparaison a été effectuée pour une cinquantaine d'échantillons, montre l'existence d'une erreur systématique. L'écart entre les résultats obtenus par les deux méthodes croît linéairement avec les teneurs en U, cet écart étant de l'ordre de 20 % en valeur absolue. Cette linéarité laisse présumer une erreur instrumentale simple comme par exemple une erreur d'étalonnage, une saturation d'un compteur, un mauvais choix des fonds continus...

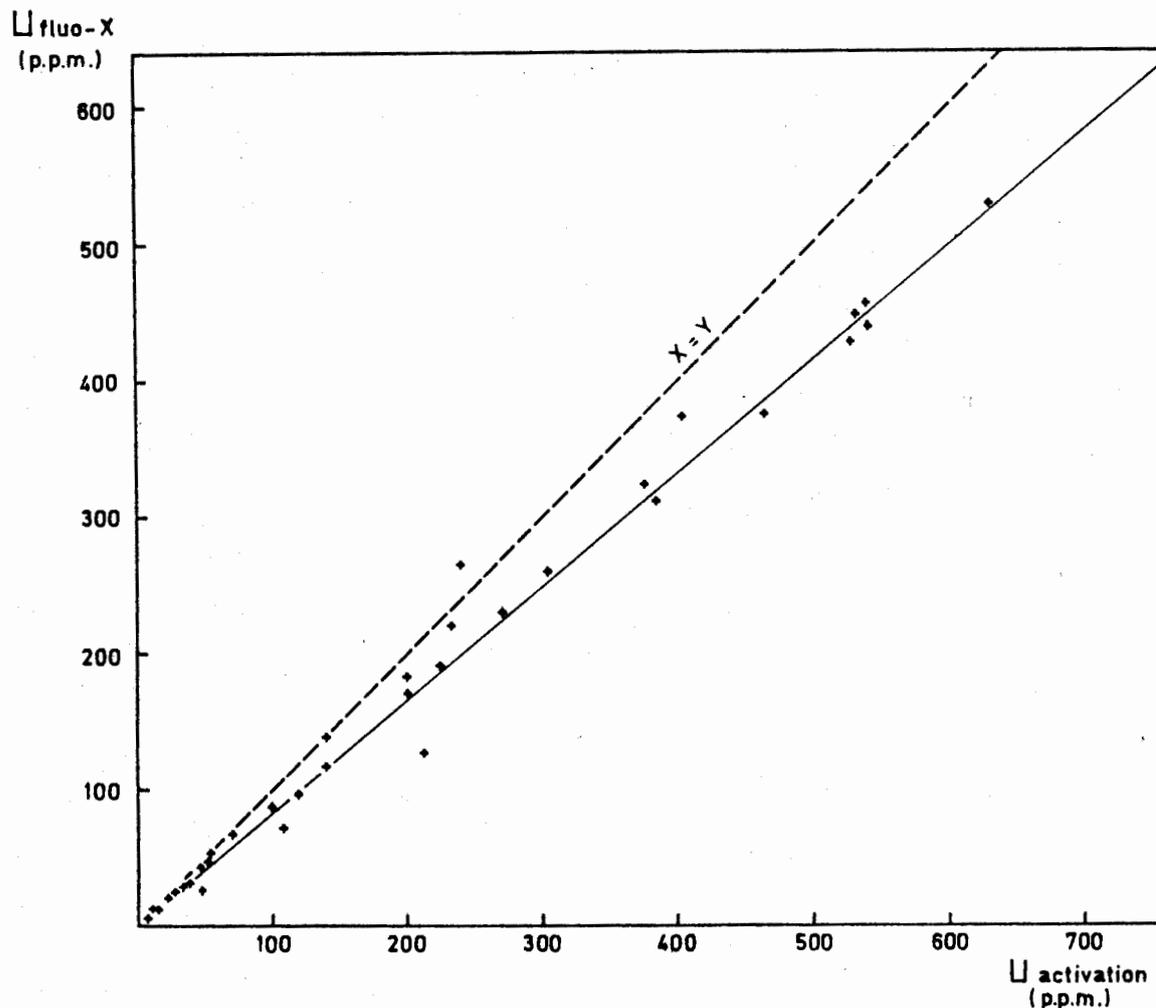


Figure 11 - Comparaison des analyses d'uranium par activation et fluo-X.

Vu la fiabilité généralement reconnue à la méthode des neutrons retardés et le caractère nouveau de la méthode de fluo-X il est logique de suspecter cette dernière méthode. Cependant, malgré de très nombreux essais et vérifications, aucune cause d'erreur n'a pu être mise en évidence. Le problème n'a pu être résolu jusqu'à présent, seules de nouvelles mesures par une méthode indépendante ou l'utilisation de standards à teneurs de l'ordre de 50-500 ppm d'U, permettraient de lever cette indétermination.

La comparaison de la figure 11 montre par la même occasion la validité des prévisions théoriques concernant la limite de détection : les valeurs obtenues par fluo-X sont très proches de celles obtenues par activation jusqu'aux environs de 3 ppm, ce qui est remarquable.

c. Conclusions

Malgré la question non résolue de la précision, la méthode mise au point devrait permettre le dosage de traces d'U dans tout échantillon de roches, sols, minerais depuis des teneurs de quelques milliers de ppm jusqu'à des teneurs de quelques ppm.

La reproductibilité est excellente et la méthode est en outre très rapide (préparation d'échantillon réduite au strict minimum) et susceptible d'une automatisation poussée (passeur d'échantillons).

Elle devrait concurrencer l'analyse par activation en exploration minière dans les nombreux cas de non disponibilité d'un réacteur.

VII.1.3. Analyse semi-quantitative du phosphore par spectrofluorescence de rayons X

Le phosphore a été analysé sur les mêmes pastilles de poudre crue, au moyen d'une anticathode de Cr et d'un cristal de Ge (qui élimine l'interférence du Ca $K\beta$ 2e ordre).

Les effets de matrice étant très faibles pour des teneurs inférieures à quelques milliers de ppm en P_2O_5 (NORRISH et CHAPPELL, 1977), une droite d'étalonnage a été établie à partir de standards internationaux. Elle s'avère effectivement linéaire pour des teneurs inférieures à 0,7 %.

Comme on pouvait s'y attendre la majeure partie des échantillons montre des teneurs largement supérieures. Dans ces conditions, le phosphore devient un élément majeur et les effets de matrice, importants, ne sont pas prévisibles. Dans ce cas, les résultats exprimés en coups par seconde (c.p.s.), doivent être considérés comme un bon semi-quantitatif. Seules les analyses des échantillons de lithologie assez constante, dont la matrice peut être considérée comme constante, sont strictement comparables entre-eux.

VII.1.4. Analyses minéralogiques par diffraction X

Les analyses ont été effectuées sur les pastilles fluo-X au moyen d'un diffractomètre Philips et du rayonnement $Cu K\alpha$.

VII. 1.5. Localisation de l'uranium par autoradiographie alpha

La répartition des éléments radioactifs à l'échelle microscopique a été étudiée sur lame mince par autoradiographie au moyen de plaques photographiques nucléaires ILFORD K2 de 100 microns d'épaisseur, sensibles aux rayons alpha (BOWIE, 1954 ; 1977).

Les émulsions ont été exposées 24 jours, développées et repérées suivant les techniques décrites par PICCIOTTO (1949) et JEDWAB (1963). Les plages de colophanites étant assez sombres, une courte exposition à la lumière du couple plaque nucléaire-lame mince permet un repérage aisé de ces dernières.

TABLEAU V : Résultats des analyses chimiques

1. Anomalies liées aux calcaires.

	n° de l'échantillon	Activ.neutr. U (ppm)	Fluo-X		Nature de l'échantillon
			U(ppm)	P ₂ O ₅ (cps ou %)	
a. Calcaires VISEENS à éléments phosphatés.	A/C4 bis	15,3	13	502	Calcaire crinoïdique à éléments phosphatés
	A/C6	4,4	n.d	0,10%	Calcaire crinoïdique
	A/C27	3,2	n.d	0,17%	Calcaire crinoïdique
	A/C44	-	10	0,14%	Calcaire crinoïdique
	A/D179 a	99,4	87	3.552	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	A/D179 b	3,1	n.d	0,12%	Brèche calcaire
	D/M7	-	14	990	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	D/M10	-	9	0,13%	Brèche calcaire
	D/M11	-	30	1.020	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	D/M12	-	62	3.568	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	BO/03	139	119	5.391	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	BO/R2	49,3	44	1,373	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	BO/R3	13,7	12	0,40%	Brèche calcaire
	BO/R4	375	324	10.424	Brèche calcaire à éléments phosphatés
	BO/R5 a	43,7	35	1.046	Brèche calcaire à rares éléments phosphatés
	BO/R5 b	203	171	4.955	Brèche calcaire à gros éléments phosphatés
	BO/R5 c	37,0	31	789	Brèche calcaire à petits éléments phosphatés
	BO/R6	28,2	24	744	Brèche calcaire à rares éléments phosphatés
	BO/R7	24,0	20	1.233	Brèche calcaire à petits éléments phosphatés
	BO/R8	31,9	25	1.280	Brèche calcaire (pas d'éléments phosphatés visibles)
BO/R9	26,8	23	516	Brèche calcaire à rares éléments phosphatés	
BO/R10	23,9	20	694	Brèche calcaire à nombreux éléments phosphatés	
BO/R11 a	11,3	9	1.195	Brèche calcaire à rares éléments phosphatés	
BO/R12	11,9	11	0,46%	Brèche calcaire (pas d'éléments phosphatés visibles)	
BO/R15	16,8	16	0,68%	Brèche calcaire à rares éléments phosphatés	
BO/R17	226	195	6.588	Brèche calcaire à éléments phosphatés	
BO/R17 bis	5,3	n.d	0,06%	Brèche calcaire (pas d'éléments phosphatés visibles)	
BO/R18	385	313	1.086	Brèche calcaire à éléments phosphatés	
BO/R18 bis	11,7	10	0,48%	Brèche calcaire (pas d'éléments phosphatés visibles)	
BO/R19	22,4	19	657	Brèche calcaire (pas d'éléments phosphatés visibles)	
b. Calcaires FRASNIENS à éléments phosphatés	VS-CK1	66,9	54	3.536	Brèche calcaire à petits éléments phosphatés
	VS-CK4	-	38	3.426	Brèche calcaire à très nombreux éléments phosphatés
	VS-CK10	-	37	1.401	Brèche calcaire à éléments phosphatés
c. Grès et calcaires à éléments phosphatés.	A/C31	53,1	48	1.823	Grès beige à éléments phosphatés
	A/C33	23,1	20	728	Grès gris à éléments phosphatés
	A/C34	285	-	11.734	Calcaire à nombreux éléments phosphatés
	A/C37	365	259	11.259	Grès beige à gros éléments phosphatés
	A/C171	248	142	11.205	Roche altérée brune à pyrite, gypse et éléments phosphatés
d. Phosphorites et élément phosphaté pur	A/C36	607	-	28.791	Phosphorites
	A/C37 bis	630	506	26.301	Élément phosphaté pur
	A/C176	693	450	23.577	Phosphorites
	A/D3	525	431	24.623	Phosphorites
	A/D170 b	424	280	19.574	Phosphorites
e. Calcaires silicifiés et phtanites du V3c sup.	D/N1 a	4,1	n.d	< 0,05%	Calcaire silicifié
	D/N1 d	0,8	n.d	< 0,05%	Calcaire silicifié
	VS-CF5	0,7	n.d	< 0,05%	Phtanite du V3c sup.

n.d = < 5 ppm

TABLEAU V : Résultats des analyses chimiques (suite 1)

2. Anomalies liées aux brèches polygènes en remplissage de poches de dissolution

	n° de l'échantillon	Activ.neutr. U (ppm)	Fluo-X		Nature de l'échantillon	
			U(ppm)	P ₂ O ₅ (cps ou %)		
f. Brèches polygènes à ciment phosphatés	A/B2	213-	149	8.180	Brèche polygène et polychrome	
	A/B3	541	439	9.392	Brèche à autunite et torbernite	
	A/B15 b	224	-	>15.000	Brèche hétérogène et polychrome à éléments noirs	
	A/B18	271	232	10.030	Brèche polychrome	
	A/B19 a	417	279	17.981	Brèche polychrome	
	A/B19 b	540	456	17.657	Brèche polychrome (namurienne?)	
	A/B20	533	424	14.424	Brèche polygène brune et grise	
	A/B32	52,3	49	2.612	Brèche polygène brune	
	A/B32 bis	125	88	4.845	Petits fragments ocres isolés de A/B32 bis	
	A/C38	169	113	10.422	Brèche brun jaune à éléments noirs	
	A/C40	121	99	8.954	Brèche orangée	
	A/D2	581	357	23.489	Brèche très dense à éléments noirs	
	A/D4 a	275	-	11.969	Brèche brune à éléments noirs	
	A/D4 b	213	144	8.329	Brèche brune à éléments noirs	
	R/E120 a	104	71	2.791	Roche brune silicifiée (namurienne?)	
	R/E120 b	240	250	7.619	Roche noire (namurienne?)	
	R/J2	303	260	7.016	Remplissage de karst à minéraux phosphatés	
	VS-CM55 c	140	140	3.039	Brèches à petits fragments noirs	
	VS-CN1	41,4	37	1.684	Remplissage de karst	
	VS-CN1 bis	29,8	25	2.020	Petits fragments ocres isolés dans VS-CN1	
	VS-CN2	15,5	14	0,45%	Remplissage de karst	
	VS-CN3	52,4	48	1.982	Remplissage de karst	
	VS-CN4	29,6	32	557	Remplissage de karst	
	VS-CN5	463	376	12.370	Remplissage de karst brun orangé	
	VS-CN6	202	185	6.989	Remplissage de karst gris	
	Be/P1	29,2	17	2.954	Brèche polygène et polychrome	
	g. Shales NAMURIENS en remplissage de karsts	A/B4 a	55,1	52	1.193	Shales noirs
		A/B4 b	50,2	54	0,67%	Shales noirs et violets
		A/B4 c	15,5	-	0,05%	Shales bruns et violets
		A/B4 d1	44,5	-	1.496	Shales violets à taches jaunes
A/B4 d2		44,6	41	1.555	Shales violets à taches jaunes	
A/B5		7,2	-	0,06%	Anciennes ampélites calcinées, rougeâtres	
A/B6		11,2	-	0,05%	Shales noirs et violets	
A/B7		14,3	-	0,05%	Shales noirs et violets	
A/B8 a		6,9	8	< 0,05%	Shales beiges, fins et micacés	
A/B8 b		11,6	16	< 0,05%	Shales violets et noirs	
A/B8 c		13,9	14	< 0,05%	Shales noirs et violets	
A/B9		7,4	8	< 0,05%	Shales beiges	
A/B12		45,9	50	640	Shales noirs, très fins	
A/B13		44,4	51	808	Shales noirs, fins	
A/B14		108	101	1.256	Shales bruns et violets	
A/B15 a ₁		110	-	0,77%	Shales noirs, fins, à taches jaune-vert	
A/B15 a ₂		147	-	743	Shales noirs et violets	
SH24		-	28	0,22%	Shales noirs à niveaux pyriteux (toit d'une poche de dissolution - sondage d'Heibaart)	
SH25		-	15	0,09%		

3. Anomalies liées aux argilites noires du Viséen supérieur (V3c inf.)

	n° de l'échantillon	Activ.neutr. U (ppm)	Fluo-X		Nature de l'échantillon
			U(ppm)	P ₂ O ₅ (cps ou %)	
h. Argilites du V3c inf.	VS-CF1	73,1	69	983	Argilites
	VS-CF2	44,2	41	< 0,05%	Argilites
	VS-CF4	43,0	28	0,05%	Argilites noires
	VS-CF6	47,2	43	0,26%	Argilites violettes
	VS-CF7	-	100	7.578	Argilites à points jaunes
	VS-CF8	235	222	3.971	Argilites à points jaunes
	VS-CF12	28,2	26	0,70%	Argilites calcareuses noires
	VS-CF13	106	-	0,41%	Argilites calcareuses noires à traces blanches, roses et orangées.

4. Roches diverses

i. Shales NAMURIENS	BO/R20 a	2,2	n.d	< 0,05%	Shales
	BO/R20 c	4,4	n.d	< 0,05%	Shales
	SH1	3,6	n.d	0,12%	Shales noirs (sondage d'Heibaart)
	SH3	3,8	-	0,09%	idem
	SH8	3,5	-	0,08%	idem
	SH15	3,1	n.d	0,08%	idem
	SH20	3,7	n.d	0,11%	idem
	SH22	3,2	n.d	0,16%	idem
	SH23	1,8	-	0,10%	Shales noirs à niveau pyriteux(sondage d'Heibaart)
j. divers	A/B17	0,4	n.d	14.045	Concre de Destinézite
	D/N1 b	33,8	30	0,13%	Argiles plastiques grises

n.d = < 5 ppm

VII. 2. Résultats et interprétation des analyses chimiques

Les résultats des analyses d'U et de P sont reportées, par groupe d'anomalies, au tableau V.

Les nombreux enregistrements effectués pour la mise au point des analyses d'U par fluo-X permettent également de montrer que :

- les teneurs en Th sont toujours très faibles (< 10 ppm) ;
- les calcaires sont caractérisés par de fortes teneurs en Sr ($Sr > Y \gg Rb$) ;
- les teneurs en Y et Pb croissent avec les teneurs en P.

VII.2.1. Anomalies liées aux calcaires

Le report graphique des analyses d'U⁺ et P pour les 42 échantillons appartenant aux anomalies radioactives liées aux calcaires, permet une série d'observations (fig. 13) :

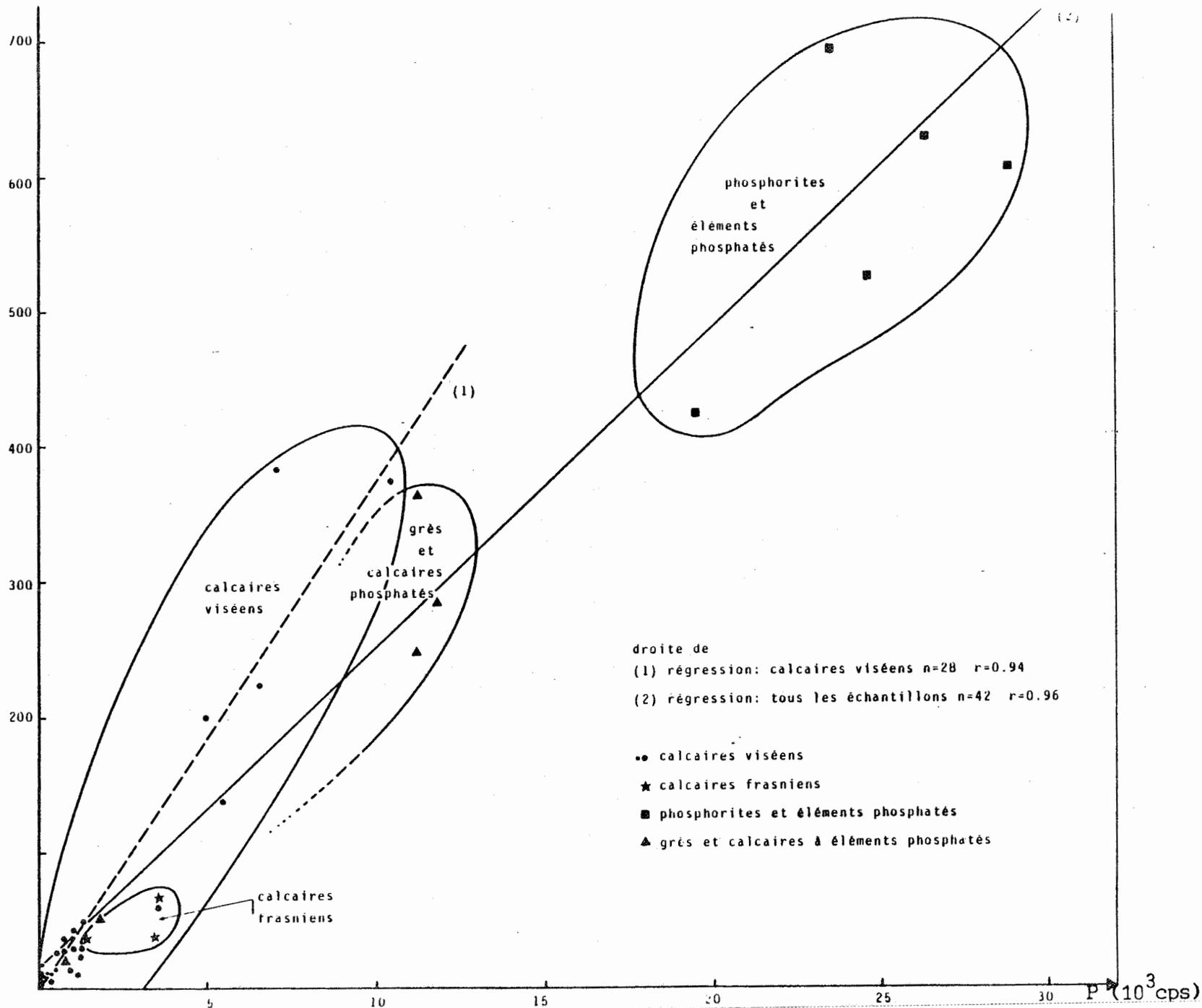
- Il existe une très nette corrélation U - P pour l'ensemble des échantillons
Le coefficient de corrélation de 0,96 est fort significatif si l'on considère et l'hétérogénéité des échantillons (calcaires, grès, phosphorites) et le caractère semi-quantitatif de l'analyse du phosphore.
- Les points représentatifs des phosphorites s'individualisent nettement de l'ensemble avec les teneurs les plus élevées en U et P. Ils sont assez bien groupés autour de la droite de régression.
- Les points représentatifs des calcaires viséens forment un autre nuage bien individualisé, allongé depuis les teneurs nulles jusqu'aux teneurs moyennes en U et P. Une régression calculée uniquement pour ce groupe montre également une corrélation très élevée ($r = 0,94$), cependant la pente de la droite est nettement plus forte. Cette différence de pente doit vraisemblablement être attribuée aux effets de matrice affectant l'analyse du P.

(+) Les valeurs obtenues par activation ont été utilisées de préférence.

Figure 13 - Relations U-P dans les anomalies liées aux calcaires.

U (ppm)

Figure 13 - Relations U-P dans les anomalies liées aux calcaires.



- Les points représentatifs des grès et calcaires phosphatés, peu nombreux (5 échantillons), ont une distribution proche de la droite de régression générale.
- Les calcaires frasniens à éléments phosphatés (Vallon de Souvré), seulement au nombre de trois, se distribuent sous la droite de régression générale, ce qui signifie qu'à teneur égale en P ils possèdent des teneurs nettement plus faibles en U que les calcaires viséens.
Ce résultat corrobore les observations de terrain qui montrent une faible radioactivité malgré l'abondance des phosphates (cf. IV.4).

Abordons l'importante question des teneurs en U des éléments phosphatés. La corrélation linéaire U-P, qui s'observe statistiquement (fig. 13), prouve que ces éléments possèdent des teneurs assez constantes en U. En conséquence, la relation linéaire calculée doit permettre d'extrapoler la teneur moyenne en U d'un élément phosphaté (100 % colophanite).

L'observation microscopique et diffractométrique des échantillons de phosphorite les plus riches en P (A/C 36, A/C 37bis, A/C 176) montre qu'ils contiennent au minimum 90 % de colophanite (les 10% restant sont constitués de quartz et calcite). On peut donc estimer que les "éléments phosphatés" contiennent en moyennes 700 à 750 ppm d'U.

Cette teneur ainsi que celle de la plupart des échantillons à éléments phosphatés visibles paraît fort élevée par rapport aux données de la littérature concernant les teneurs moyennes des phosphorites (tableau VI).

De telles comparaisons sont cependant très délicates à effectuer vu la disparité des données, l'absence de renseignements statistiques, les erreurs introduites par l'utilisation de la moyenne arithmétique, etc... A Visé, l'échantillonnage ayant été guidé par la scintillométrie il en résulte vraisemblablement un biais vers les fortes teneurs.

TABLEAU VI : Comparaison des teneurs moyennes en U

Type de roche	teneur en U (p.p.m.)	référence
Calcaires viséens à éléments phosphatés (moyenne n = 30)	64 (3-335)	ce travail
Phosphorites viséennes (?) (moyenne n = 5)	576	ce travail
Brèches polygènes à ciment phosphaté (moyenne n = 26)	228 (15-540)	ce travail
Argilites V3c inférieur (moyenne n = 8)	85 (26-222)	ce travail
Calcaires de la plateforme russe (moyenne n = 128)	2,1	in WEDEPOHL (1974)
Black shale	8	"
Phosphorites marines	8-300	Mc KELVEY (1956)
Phosphorites monde entier (étendue des teneurs)	8-1300	in Mc CONNEL (1973)
Phosphorites de la "Phosphoria formation" (n = 60)	90 (20-210)	GULDBRANDSEN (1966)
Phosphorites Israël (n = 49)	60-230	NATHAN et Coll. (1976)

VII. 2.2. Anomalies liées aux brèches polygènes en remplissage de poches de dissolution

Les deux types de brèches distinguées dans les conclusions du chapitre V se différencient également sur le plan géochimique et seront donc discutées séparément.

a. Brèches à ciment phosphaté

Une très nette corrélation U-P existe également pour les échantillons de ce groupe.

Le coefficient de corrélation de 0,86 plus faible que pour le groupe d'anomalies précédent (fig. 14), est cependant très significatif si l'on considère

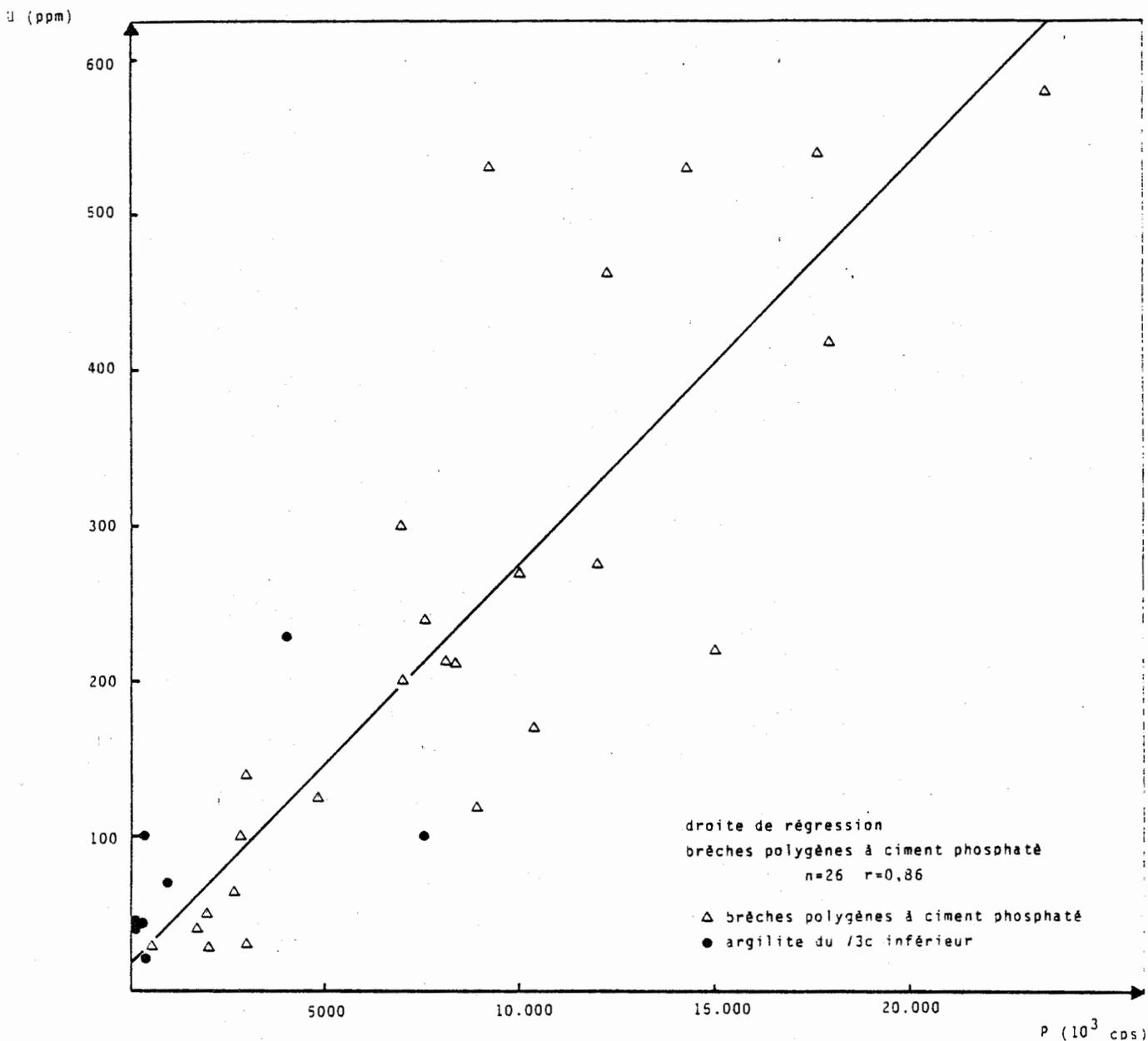


Figure 14 - Relation U-P dans les brèches polygènes à ciment phosphaté et dans les argilites.

et la grande hétérogénéité de ces brèches et le caractère semi-quantitatif de l'analyse du phosphore.

Le nuage de points représentatif de ces brèches (fig. 14) s'étend sur toute la gamme des teneurs en U et P et il est remarquable de constater qu'il recouvre l'ensemble des domaines occupés par les calcaires viséens, les grès et calcaires à débris phosphatés et les phosphorites (fig. 13). Ce fait est également confirmé par les pentes des droites de régression relatives aux deux groupes d'anomalies (calcaires et brèches) qui, malgré une faible différence, doivent être considérées comme identiques.

b. Brèches d'effondrement

La corrélation U - P calculée pour 17 shales namuriens est de 0,53 ce qui est nettement plus faible et ne permet pas de tirer des conclusions aussi péremptoires.

Les teneurs en U ne sont manifestement pas uniquement dues aux variations du P et il n'est pas étonnant qu'il existe une corrélation U - carbone organique dans certains de ces shales. Une telle corrélation a d'ailleurs été montrée par JEDWAB (1959) pour des grès appartenant à ces mêmes brèches.

VII.2.3. Anomalies liées aux argilites

Ici également, il semble qu'il existe une relation linéaire entre U et P. Cependant, le très petit nombre d'échantillons analysés (n = 8) n'autorise aucun calcul statistique.

Les points représentatifs des argilites (fig. 14) appartiennent également au nuage défini aux paragraphes précédents.

La teneur moyenne calculée sur les huit échantillons est de 85 ppm.

VII.3. Localisation de l'U à l'échelle microscopique

L'observation des autoradiographies prouve, sans aucune ambiguïté, que les éléments phosphatés présents dans les calcaires, grès et phosphorites sont effectivement les porteurs de l'uranium.

La distribution des traces alpha est uniforme au sein de chacune des plages de

colophanite, les traces sont isolées et réparties uniformément formant un fond continu assez régulier. Leur densité semble assez constante d'une plage à l'autre bien qu'aucun comptage n'ait été effectué.

Enfin, quelques essais de traces alpha en étoiles, dus à des émetteurs ponctuels, sont observés. Il s'agit vraisemblablement de minéraux accessoires tel que le zircon.

Aucune autoradiographie n'a été faite sur les brèches à ciment phosphaté.

VII.4. Etude minéralogique des phosphates

Le phosphate, qu'il soit pratiquement seul ou largement dominé par d'autres minéraux, présente des diagrammes de diffraction de rayons-X remarquablement constants (fig. 15). On a donc pu établir, à partir des échantillons les plus purs (phosphorites, ciment de la brèche), un diagramme moyen type (tableau VII) qui est tout à fait semblable à celui de la fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$).

Les diagrammes de référence de la fluorapatite (Fiche A.S.T.M. 15-876, YOUNG et coll., 1969) ont été effectués sur des termes extrêmes, l'un synthétique, l'autre naturel.

La comparaison des équidistances suggère que la fluorapatite de Visé est elle-même un terme extrême.

Ce résultat est fort étonnant alors que les données de la littérature concernant les phosphates sédimentaires font toujours mention de carbonate-fluorapatite (francolite) (THOMPSON, 1954 ; ALTSCHULLER et coll., 1958 ; SCHELDON, 1959 ; Mc CONNEL, 1973 ; NATHAN et coll., 1976 ; LUCAS et coll., 1978 etc...). Aussi, l'étude minéralogique a été poussée plus loin par la mesure indirecte du CO_2 . Cette teneur a été calculée par la méthode des "couples de pics" de GULDBRANDSEN (1970).

A Visé, les valeurs trouvées pour le couple (004)-(410) varient de 0 à 0,8 % de CO_2 , ce qui est tout à fait compatible avec la formule chimique de la fluorapatite et confirme l'identification roentgenographique. De plus, les teneurs en CO_2 des carbonates-fluorapatites mesurées par cette méthode sont supérieures : 1 à 3 % pour celles de la Phosphoria Formation (GULDBRANDSEN, 1970), 5 à 6 % pour celles du Cap Ortégal (LUCAS et coll., 1978).

- (1) d'un calcaire à nodules phosphatés (éch. BO/R4)
- (2) d'un nodule phosphaté presque pur (fluorapatite) (éch. A/C36)
- (3) d'une brèche (éch. A/B19-a).

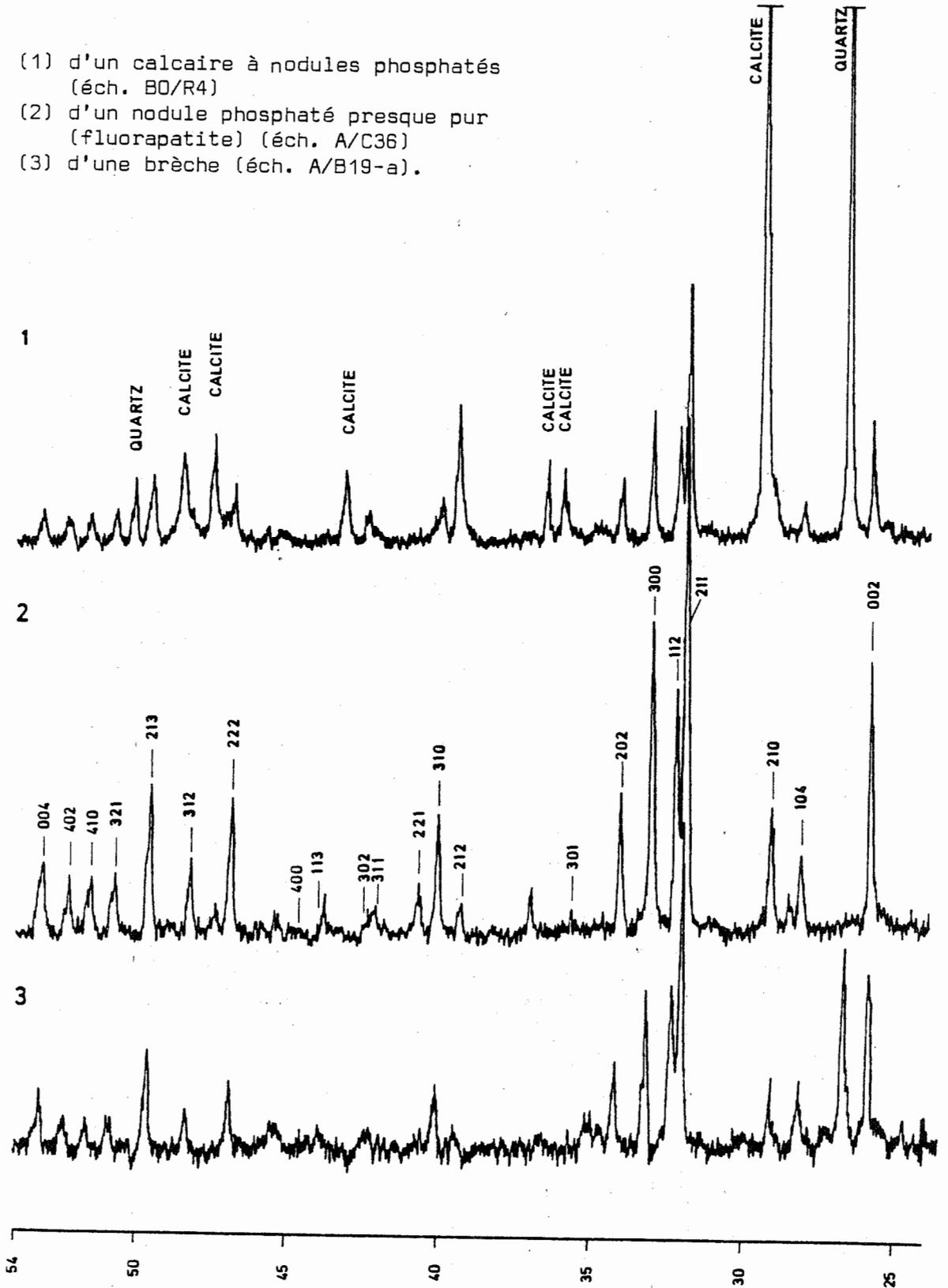


Figure 15 - Diagrammes de diffraction des rayons X
(anticathode Cu, filtre Ni)

TABLEAU VII : Données diffractométriques pour l'apatite de Visé.

(hkl)	Apatite (Visé) (A/C 37 bis)		Fluorapatite ASTM 15-876		Fluorapatite Cerro de Mercado (Mexico)(1969)		
	d(Å)	I	d(Å)	I	d(Å) mesurés measured	d(Å) calculés calculated	I
100	8,12		8,12	8	8,12	8,13	7
101	5,29		5,25	4	5,24	5,25	5
200	4,059		4,055	8	4,059	4,066	6
111	3,884		3,872	8	3,870	3,878	8
002	3,454	60	3,442	40	3,434	3,439	46
102	3,166	15	3,167	14	3,163	3,167	18
210	3,072	30	3,067	18	3,072	3,074	16
211	2,800	100	2,800	100	2,803	2,806	100
112	2,781	50	2,772	55	2,773	2,774	34
300	2,707	70	2,702	60	2,708	2,711	39
202	2,632	30	2,624	30	2,625	2,626	23
301	2,521		2,517	6	2,520	2,522	5
212	2,287		2,289	8	2,292	2,292	5
310	2,255	30	2,250	20	2,255	2,256	15
221	2,218		2,218	4	2,221	2,222	2
311	2,142		2,140	6	2,143	2,143	7
302	2,127		2,128	4	-	-	-
113	2,067		2,061	6	2,061	2,060	4
400	2,038		2,028	2	-	-	-
203	-	-	-	-	1,998	1,997	3
222	1,944	30	1,937	25	1,939	1,939	15
312	1,880		1,884	14	1,886	1,886	9
320	-	-	-	-	1,865	1,865	4
213	1,841	30	1,837	30	1,838	1,838	28
321	1,808	15	1,797	16	1,801	1,801	11
410	1,7746	15	1,771	14	1,775	1,775	6
402	1,7524	15	1,748	14	-	-	-
004	1,7270	15	1,722	16	-	-	-

VII. 5. Conclusions

Les résultats des investigations géochimiques (forte corrélation U - P), autoradiographiques (traces α dispersées dans la colophanite) et minéralogiques (fluorapatite) concordent et démontrent que l'uranium est essentiellement lié au réseau de la fluorapatite.

Cette conclusion est en outre valable pour les trois types d'anomalies rencontrées (calcaires, argilites, brèches de dissolution). Notons cependant que dans les brèches à ciment phosphaté on rencontre localement de l'autunite et de la torbernite.

Ce résultat n'a rien d'étonnant, la substitution du Ca par des traces d'U dans le réseau des apatites est, en effet, bien connue des minéralogistes (GOLDSCHMIDT, 1954 ; ALTSCHULLER et coll., 1958).

Les teneurs en uranium paraissent élevées par rapport aux données de la littérature (tableau VII), d'autant plus que de nombreux échantillons sont pauvres en phosphates. L'excellente linéarité des relations U - P observées statistiquement dans les calcaires à éléments phosphatés, phosphorites et brèches à ciment phosphaté (fig. 13, 14) montre que les éléments ou le ciment phosphatés possèdent des teneurs assez constantes en uranium, déduction confirmée par l'examen des autoradiographies.

On peut donc estimer (par extrapolation) que la fluorapatite contient en moyenne 650 à 750 ppm d'uranium. Cette teneur est fort élevée pour une apatite naturelle : *"Nevertheless, within major occurrence of the same nature, the level of concentration is of the same order of magnitude, 0.00X to 0.03 percent. This range in uranium content may be taken to embrace the great bulk of apatite in the lithosphere and departures from it may be safely considered unusual and examples of special history"* (ALTSCHULLER et coll., 1958, p.51).

Ces teneurs anormalement élevés en uranium pourraient être mises en relation avec la nature non carbonatée de l'apatite, étonnante pour des milieux sédimentaire. En effet, la fluorapatite se rencontre plus fréquemment dans des roches ignées ou métamorphiques que dans des roches sédimentaires.

VIII. CONCLUSIONS

1. Résultats de la prospection et des études géologiques

La prospection scintillométrique systématique et détaillée du Massif de Visé (40 km²) a permis de mettre en évidence 30 anomalies radioactives dont 20 nouvelles (tableau II).

Ces anomalies se distribuent exclusivement dans les zones d'affleurements des terrains dévoniens supérieurs et dinantiens (fig. 5, 6, 7), en l'occurrence la rive gauche de la Meuse et la vallée de la Berwinne. Leur densité est assez forte vu le faible nombre d'affleurements et leur intensité, très variable à l'échelle métrique, s'échelonne entre 20 μ R/h (deux fois le fond continu) et 500 μ R/h.

L'observation géologique permet de regrouper ces anomalies suivant leur appartenance ou leur liaison avec trois types lithologiques :

- les calcaires (15 anomalies) ;
- les brèches polygènes en remplissage de poches de dissolution (10 anomalies) ;
- les argilites noires du Viséen supérieur (1 anomalie).

Ces trois groupes homogènes et bien distincts sur le terrain sont d'inégale importance : les calcaires présentent des surfaces d'affleurement nettement supérieures à celles occupées par les brèches polygènes ; les argilites ne constituent que de minces niveaux affleurant sur une centaine de mètres dans la "carrière F" des carrières de Richelle.

Dans le groupe des anomalies liées aux calcaires, la radioactivité est toujours due à la présence de phosphates qui s'observent le plus souvent sous forme d'éléments dans des brèches calcaires du V3by, parfois sous forme de ciment dans ces mêmes brèches ou exceptionnellement sous forme de débris lithiques dans des grès, calcaires et phosphorites. Cette exception,

particulièrement intéressante et inattendue, constitue le ciment d'une brèche tectonique à Argenteau. Divers arguments suggèrent un même âge V3bγ pour ces niveaux qui ont vraisemblablement été injectés dans les calcaires lors de la phase sudète des plissements hercyniens.

Dans le groupe des brèches polygènes en remplissage de poche de dissolution la radioactivité est également liée à l'abondance du ciment phosphaté. On y distingue :

- des brèches de dissolution à ciment phosphaté abondant qui forment la bordure inférieure des karsts,
- des brèches d'effondrement polygènes à ciment subordonné qui forment le remplissage des karsts.

Dans les argilites noires du V3c inférieur, seule l'analyse diffractométrique permet de montrer la présence de phosphate de calcium.

Dans le Massif de Visé, les anomalies radioactives sont donc systématiquement liées à la présence de phosphate de calcium qui s'observe, soit dans des roches primaires (calcaires, phosphorites, argilites), soit dans des roches secondaires (brèches polygènes de karst).

2. Résultats des études chimiques et minéralogiques

Une centaine d'échantillons représentatifs de toutes les anomalies ont été analysés quantitativement pour l'U et semi-quantitativement pour le P. L'analyse qualitative montre que les teneurs en Th sont inférieures à 10 ppm. La discussion de ces résultats permet :

- de montrer l'existence d'une très nette corrélation linéaire U-P pour les anomalies liées aux calcaires ($r = 0,96$ pour $n = 42$, fig. 13), pour les brèches de dissolution à ciment phosphaté ($r : 0,86$ pour $n = 26$, fig. 14) et pour les argilites ($n = 8$, fig. 14) ;
- de voir que les nuages de points représentatifs des trois groupes d'anomalies occupent des zones qui se recouvrent, ce qui se traduit statistiquement par des droites de régression de pentes très proches (comparer les fig. 13 et 14).

La localisation de l'U à l'échelle microscopique par autoradiographie alpha démontre que les éléments phosphatés sont effectivement les porteurs de l'U, que cet élément est dispersé uniformément et que les teneurs sont assez constantes.

L'étude minéralogique des phosphates prouve qu'il s'agit toujours d'une fluorapatite dont la teneur en CO_2 est inférieure à 1 %.

En conséquence, les résultats des investigations géochimiques, autoradiographiques et minéralogiques concordent et démontrent que l'U est essentiellement lié au réseau de la fluorapatite dans les trois groupes d'anomalies décelées.

Ces études permettent en outre d'estimer que la fluorapatite contient en moyenne 650 à 750 ppm d'U ce qui est anormalement élevé, la gamme des teneurs normales se situant entre 0,00X et 0,03 % (ALTSCHULLER et coll., 1958).

Les teneurs moyennes en U des différents groupes d'anomalies paraissent élevées par rapport aux données de la littérature (tableau VI). Ce type de comparaison est fortement criticable lorsqu'il s'agit d'éléments en trace en effet, les moyennes arithmétiques sont de très mauvais estimateurs de tendance centrale pour les distributions surdispersées observées dans ces cas là.

L'histogramme construit en utilisant les valeurs logarithmiques de tous les échantillons à relation linéaire $U - P^+$ est bimodal, chacune des populations paraissant s'ajuster à une distribution lognormale (fig. 16). Le report des fréquences cumulées sur papier de probabilité (fig. 17), permet de vérifier la lognormalité et de séparer graphiquement ces deux populations (d'après SINCLAIR, 1976). Elles sont présentées dans des proportions assez proches ($A/B = 55/45$).

La population A, dont la moyenne géométrique estimée vaut 25 ppm U (8-74 ppm pour une déviation standard), comprend la majeure partie des calcaires viséens, des grès et calcaires phosphatés ainsi qu'une partie des brèches polygènes à ciment phosphaté.

(+) $n = 66$. Les calcaires frasniens et les shales de remplissage de karst ont été exclus.

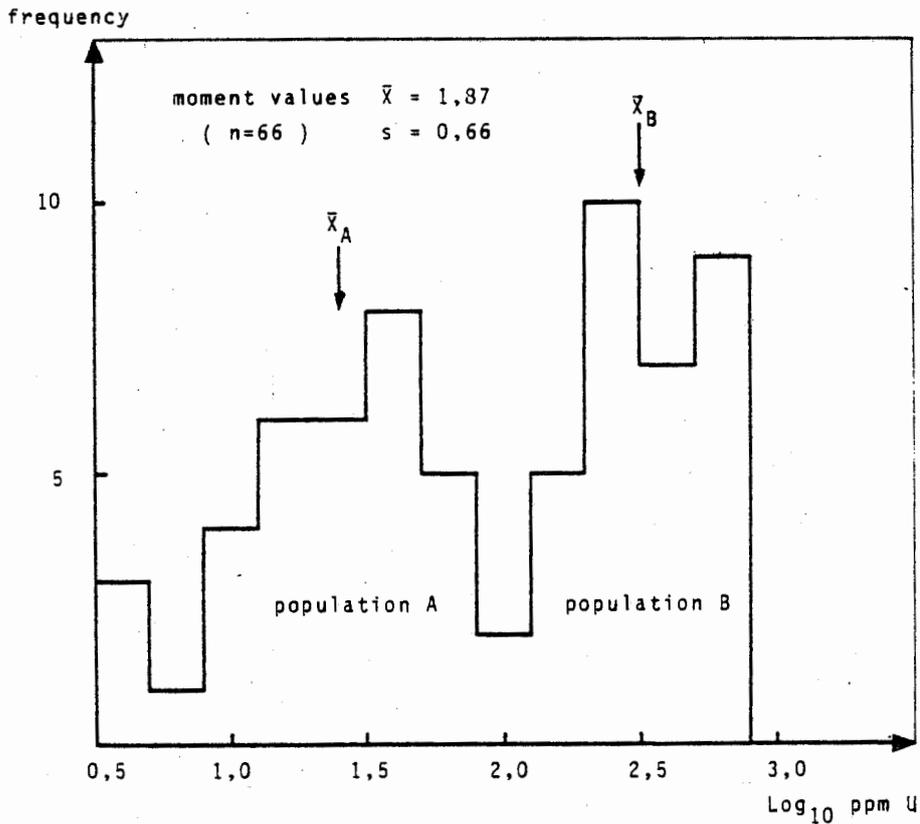


Figure 16. - Histogramme de fréquence des teneurs en U dans 66 échantillons de Visé.

La population B, dont la moyenne géométrique estimée vaut 316 ppm U (174-550 ppm), comprend essentiellement les phosphorites et les brèches polygènes à ciment phosphaté.

Bien que les données de la littérature ne permettent pas de comparaisons précises, la population B possède manifestement des teneurs en uranium élevées pour des roches phosphatées.

probability
(cum.%)

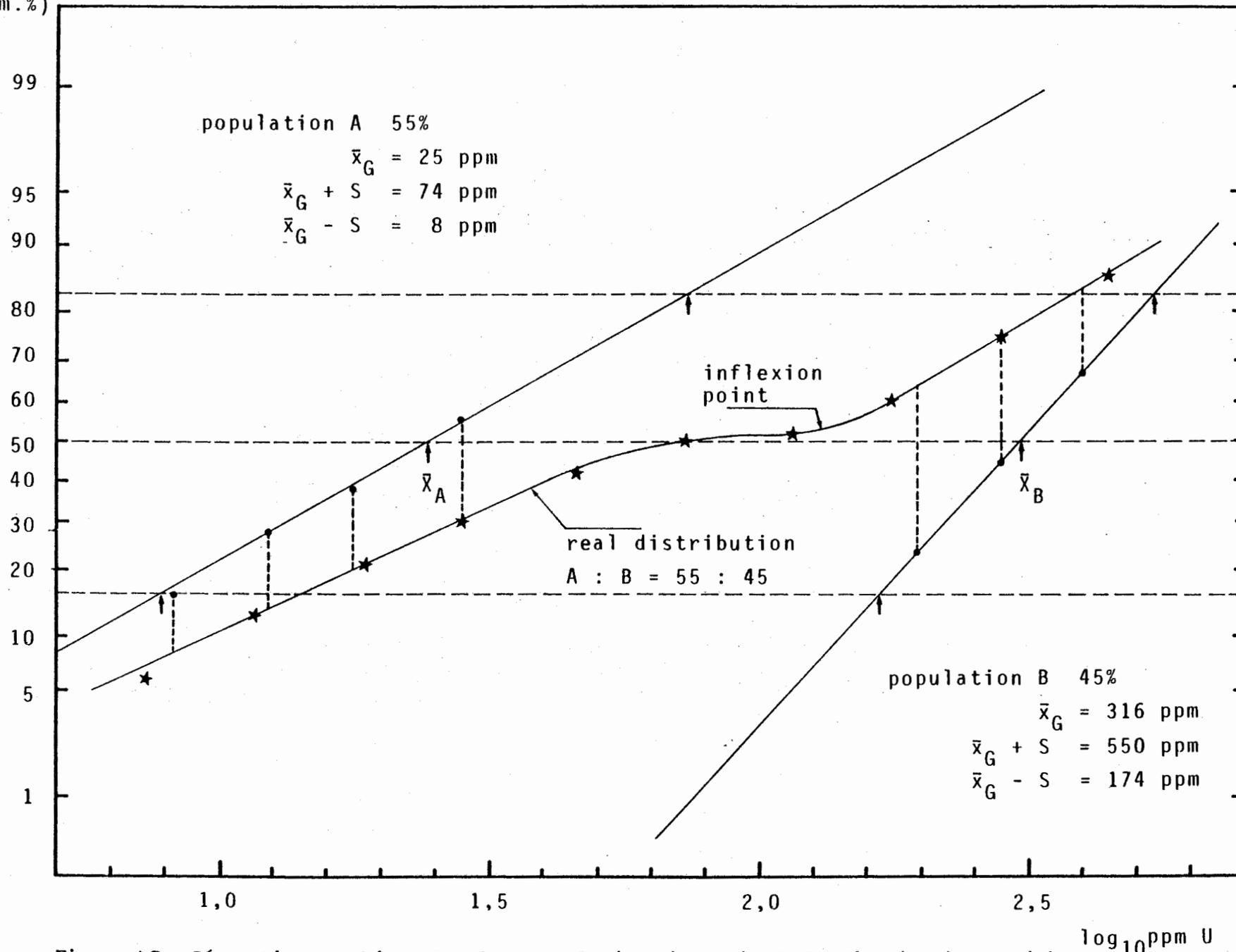


Figure 17 - Séparation graphique des deux populations à partir de la distribution expérimentale.

3. Hypothèses concernant la genèse des anomalies

Sur les trois groupes d'anomalies observées, deux ont une origine primaire : les calcaires et les argilites; les brèches polygènes ont une origine secondaire.

Dans le groupe des anomalies liées aux calcaires, de nombreux arguments (présence de ciments phosphatés dans les brèches, existence de phosphorites, grès et calcaires phosphatés ; structures caractéristiques d'une formation en milieu marin agité, etc...) permettent de supposer que les conditions dans le bassin de sédimentation étaient localement favorables à la phosphatisation des calcaires, comme cela s'observe actuellement le long de certaines marges continentales (SLANSKY, 1964 ; SUMMERHAYES, 1972 ; LUCAS et coll., 1978). Les conditions paléogéographiques régnant au Viséen supérieur (fig. 18) paraissent s'accorder avec une telle hypothèse.

Le schéma des événements imaginé par GRAULICH (1963) pour expliquer la formation des poches de dissolution est parfaitement cohérent (cf. II.3.1) par contre celui concernant la genèse des concentrations en U (et P) liées aux brèches polygènes doit être revu à la lumière des éléments nouveaux apportés par le présent travail.

L'origine du P et de l'U, qui s'observent, rappelons-le, essentiellement dans des brèches de dissolution à ciment phosphaté situées en bordure des karsts, doit vraisemblablement être attribuée aux phosphates dispersés dans les brèches calcaires du V3by. De nombreux arguments tels que : l'identité des teneurs en U et de la minéralogie des phosphates, la localisation des brèches riches en ciment phosphaté a proximité immédiate des calcaires, la localisation des karsts radioactifs dans le V3by, etc..., confirment cette hypothèse.

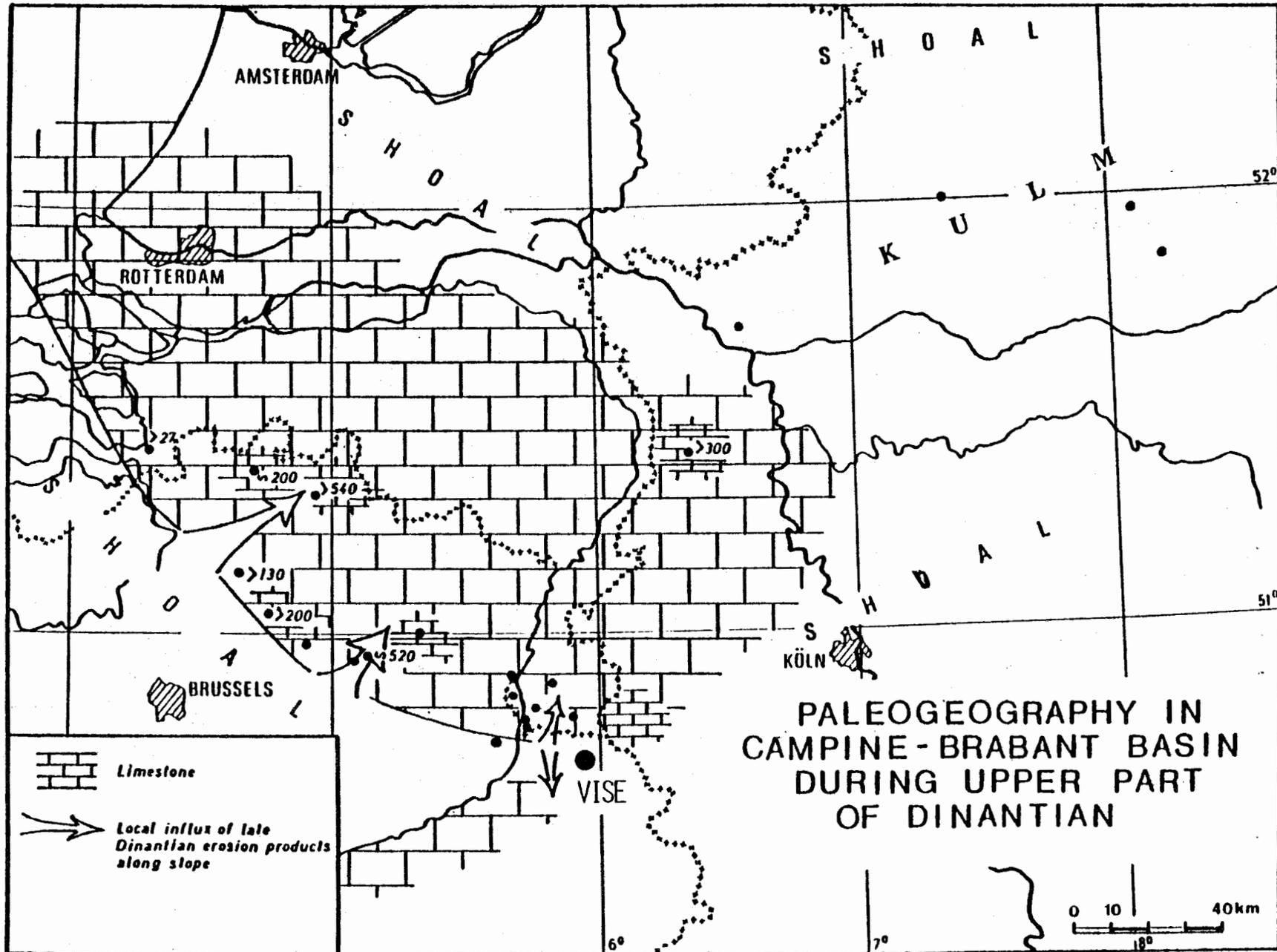


Figure 18 - Paleographie du Bassin de Campine-Brabant au Dinantien Supérieur.

d'après BLESS et coll. 1976.

Si la contribution des argilites peut être considérée comme nulle (faibles teneurs en U et P, faible épaisseur), par contre celle des phosphorites aurait pu être importante mais rien ne permet de le prouver. On ne peut exclure totalement une contribution à l'U des shales namuriens (hypothèse de GRAULICH), en particulier des shales noirs, fins et pyriteux (ampélites) qui sont connus dans les poches de dissolution. Les quelques analyses effectuées sur des shales namuriens (tableau V, moyenne 3,3 ppm U) et sur une ampélite (A/B 5 = 7 ppm U) montrent de faibles teneurs.

4. Point de vue de la géologie minière

Du point de vue de la géologie minière, seules les anomalies liées aux brèches de remplissage de poches de dissolution semblent posséder des teneurs et un volume suffisant pour justifier un certain intérêt. Dans la masse de ces brèches, seules celles à ciment phosphaté possèdent des teneurs intéressantes (population B : $\bar{X}_G = 316$ ppm), malheureusement elles ne s'observent qu'en bordure des poches et ne forment qu'une très faible partie du volume total des remplissages. Ces karsts occupent des surfaces importantes sur les deux rives de la Meuse (CALEMBERT et coll., 1971) particulièrement au nord de Visé où le flanc de l'anticlinal plonge moins rapidement. Il est intéressant de noter au passage que la localisation de ces karsts, en particulier sous la ville de Visé, fournit une explication aux fortes concentrations en radon observées dans le captage du Plétrou (tableau I).

Du point de vue des techniques d'exploration, la scintillométrie s'est avérée être un outil extrêmement sensible, bien adapté à la recherche de concentrations uranifères en milieu sédimentaire (pas de Th, peu de K). Il semble intéressant de souligner l'intérêt de la mesure du radon dans les nappes, en effet, malgré la faible ampleur des anomalies observées tous les captages de la région montrent des teneurs en Rn 222 anormales (tableau I). Par contre, les mesures effectuées sur les eaux de surface donnent des valeurs normales (1 à 4 p Ci/l).

Du point de vue de la typologie, à Visé on se trouve en présence d'un type de concentration en uranium relativement rare et peu connu. Les similitudes avec le gisement de Bakouma (Empire Centre Africain) sont nombreuses :

- géométrie karstique,
- remplissage à ciment phosphaté,
- uranium lié au réseau de la fluorapatite,
- présence d'autunite et torbernite secondaire.

Les teneurs en U y sont cependant nettement plus élevées (2.200 ppm en moyenne).

BIBLIOGRAPHIE

- ALTSHULER Z.S., CLARKE R.S., YOUNG Jr and E.J., 1958 - Geochemistry of Uranium in Apatite and Phosphorite.
U.S. Geological Survey Professional Paper 314-D., 45-90.
- BERTRANEU J., 1978 - La recherche minière moderne. Tendances et orientations au cours des dernières décennies. La relance européenne.
Bull.Soc.Frç.Min.Crist., 101, 133-138.
- BLESS M.J.M., BOUCKAERT J., BOUZET Ph., CONIL R., CORNET P., FAIRON-DEMARET M., GROESSENS E., LONGERSTAEY P.J., MEESSEN J.P.M.Th., PAPROTH E., PIRLET H., STREEL H.W.J., VAN AMERON H.W.J., and WOLF M., 1976 - Dinantian rocks in the subsurface North of the Brabant and Ardenno-Rhenish Massifs in Belgium, the Netherlands and the Federal Republic of Germany.
Mededelingen Rijks Geologische Dienst, Nieuwe Serie - 27, 3, 195 pp.
- BLESS M.J.M., BOECKAERT J., CALVER M.A., DEJONGHE L., GRAULICH J.M., HORN M., KIMPE W.F.M., KULLMANN J., MEESSEN J.P.M.Th., NAYLOR D., OLIVEIRA J.T., PAPROTH E., PARIS F., PERDIGAO J.C., RIBEIRO A., ROBARDET H., SANCHEZ DE POSADA L., TRUYOLS J., 1977 - Y a-t-il des hydrocarbures dans le Pré-Permien de l'Europe occidentale ?
Serv.Géol.Belg. Prof. Pap. 1977/11 n° 148, 58 pp.
- BOWIE S.H.U., 1954 - Nuclear emulsion techniques.
In : Nuclear Geology, edited by H. FAUL, Wiley, New York, 48-64.
- BOWIE S.H.U., 1977 - Radiographic techniques.
In : Physical Methods in Determinative Mineralogy, edited by J. ZUSSMAN, Academic Press, London 677-687.
- CALEMBERT L. et MONJOIE A., 1971 - Phénomènes géologiques et géologie de l'ingénieur dans la région de Visé.
Premier Congrès International de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur. Paris 1970 - 1. 93-107.
- DE WITTE S.M., 1977 - Contribution à l'étude de la radioactivité des roches de la région de Visé (province de Liège).
Mémoire de Licence U.L.B. 107pp.
- DUMONT A., 1832 - Mémoire sur la constitution géologique de la province de Liège.
Mémoire Cour. Acad. Roy. Sc. Bruxelles, 8.
- FRANSOLET A.M., JEDWAB J., VAN TASSEL R., 1974a - Inventaire minéralogique de Richelle, Belgique.
Ann. Soc. Géol. de Belg. 97,(1), 23-26.
- FRANSOLET A.M., JEDWAB J., VAN TASSEL R., 1974b - La Fluellite de Richelle, près de Visé, Belgique.
Ann. Soc. Géol. de Belg. 97,(1), 27-38.
- FRANSOLET A.M., JEDWAB J., VAN TASSEL R., 1974c - La Scholzite de Richelle, minéral nouveau pour la Belgique.
Ann. Soc. Géol. de Belg. 97,(2), 321-330.
- FRANSOLET A.M., JEDWAB J., VAN TASSEL R., 1974d - La Minyulite de Richelle, Belgique.
Ann. Soc. Géol. de Belg. 97,(2), 331-340.
- GOLDSCHMIDT V.M., 1954 - Geochemistry - Clarendon Press, Oxford 730pp.
- GRANIER C.L., 1973 - Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères - Masson et Cie, Paris 143 pp.
- GRAULICH J.M., 1963 - La phase sudète de l'Orogène varisque dans le synclinorium de Namur à l'Est du Samson.
Bull. Soc. Belge Géol. Pal. Hydr., 71, (2), 181-199.

- GULBRANDSEN R.A., 1966 - Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria Formation.
Geochim.Cosmochim.Acta 30, 769-778
- GULBRANDSEN R.A., 1970 - Relation of Carbon dioxide content of Apatite of the Phosphoria Formation to regional facies.
US Geological Survey Professional paper 700, B, B9-13
- HERBOSCH A., 1975 - Etude de la géochimie et de la métallogénie de l'uranium en milieu continental lacustre. Cas du Bassin Permien de Lodève-Hérault, France.
Thèse de Doctorat, U.L.B., 520pp
- JAMES G.W. and HATHAWAY L.R., 1976 - Recent advances in analytical methods for determining uranium in natural waters and geological samples.
In : Exploration for uranium ore deposits. Internat. Atomic Energy Agency, Vienna, 311-320
- JAMES G.W., 1977 - Low-level determinations of uranium and thorium by X-ray spectrometry.
In : Short Papers of the US Geological Survey Uranium-Thorium Symposium, 1977. Edited by John A. CAMPBELL. Geological Survey Circular 753, 47-48
- JEDWAB J., 1958 - Présence de Torbernite à Richelle.
Bull.Soc.Belge de Géol. 67, 300-303
- JEDWAB J., 1959 - Présence de grès uranifère à Argenteau (province de Liège).
Bull.Soc.Belge de Géologie 68, 319-323
- JEDWAB J., 1963 - Dégats radiatifs naturels dans des matériaux asphaltiques uranifères. II. Bois fossiles asphaltisé de Temple Mountain (UTAH).
Bull.Soc.belgeGéol.,Fal.,Hydr., LXXII, 401-406
- KIMPE W.F.M., BLESS M.J.M., BOUCKAERT J., CONIL R., GROESSENS E.,
MEESSEN J.P.M.Th., POTY E., STREEL M., THOREZ J. and VANGUESTAINE M., 1978
Paleozoic deposits east of the Brabant Massif in Belgium and the Netherlands.
Mededelingen Rijk Geologische Dienst, Nieuwe Serie, 30, 2, 103pp.
- KNOX R.W.O'B., 1978 - Sedimentary rocks : 28; Phosphatic rocks.
In: Petrology for students, NOCKOLDS S.R., KNOX R.W.O'B., CHINNER G.A., Cambridge University Press, Cambridge, 303-311.
- LEGRAND R., 1956 - Brèches radioactives aux environs de Visé.
Bull.Soc.Belge de Géol. 66, 211-221
- LEGRAND R., 1958 - Compte-rendu de l'excursion du 26 juin 1958 dans la région de Visé.
Bull.Soc.Belge de Géol. 67, 290-295
- LEGRAYE M., 1931 - Failles radiales de la région de Visé.
Ann.Soc.Géol. de Belgique 54, B 213-215
- LOHEST M., 1911 - Le sondage de Chertal, la discordance du Houiller et du Calcaire carbonifère, et le charriage du Massif de Visé.
Ann.Soc.Géol. de Belgique 38, 186-192.
- LUCAS J. PREVOT L. et LAMBOY M. 1978 - Les phosphorites de la marge nord de l'Espagne, chimie, minéralogie et genèse.
Oceanol.Acta, 1978, 1, 1, 55-72
- Mc CONNELL D., 1973 - Apatite.
Applied Mineralogy 5, Springer-Verlag, Wien, 111pp

- Mc KELVEY V.E., 1956 - Uranium in phosphate rock.
US.Geol.Surv.Profess.Papers 300,477
- MELON J., BOURGUIGNON P., FRANSOLET A.M., 1976 - Les minéraux de Belgique
Ed.G.LEBOTTE - 280pp
- NATHANS C.S. et LUCAS J., 1972 - Synthèse de l'apatite à partir du gypse;
application au problème de la formation des apatites carbonatées
par précipitation directe.
Chemical Geology 9, 99-112
- NATHAN Y. et SHILONI Y., 1976 - Exploration for uranium in phosphorites :
A new study on uranium in Israel.
In : Exploration for uranium ore deposits. Internat. Atomic Ener-
gy Agency, Vienna, 645-656.
- NESBITT R.W., MASTINS H., STOLZ G.W. and BRUCE D.R., 1976 - Matrix correc-
tions in trace-element analysis by X-ray fluorescence : an exten-
sion of the Compton scattering technique to long wavelengths.
Chemical Geology, 18, 203-213.
- NICOLINI P., 1970 - Géologie des concentrations minérales stratiformes.
Gauthier-Villars. Paris 792pp.
- NININGER R.D., 1977 - Recognition of uranium districts.
In : Recognition and evaluation of uraniferous areas. Proceedings
of a technical committee meeting, Vienna, 17-21 November, 1975
International Atomic Energy Agency, Vienna, 1-11.
- NORRISH K. and CHAPPELL B.W., 1977 - X-ray fluorescence spectrometry.
In : Physical methods in determinative mineralogy. Edited by
J.ZUSSMAN, Academic Press - London, 201-272.
- OSTLE D., COLEMAN R.F. and BALL T.K., 1972 - Neutron activation analysis
as an aid to geochemical prospecting for uranium.
In : Uranium prospecting handbook. Edited by BOWIE, DAVIES and
OSTLE, The Institution of Mining and Metallurgy - London, 95-109.
- PICCIOTTO E.E., 1949 - L'étude de la radioactivité des roches par la mé-
thode photographique.
Bull.Soc.Belge Géol.,Pal.,Hydro. LVIII (1), 75-91.
- PIRLET H., 1967a - Mouvements épeirogéniques Dévono-carbonifères dans la
région de Visé; la carrière de "la Folie" à Bombaye. (première note
sur les calcaires de Visé).
Ann.Soc.Géol. de Belgique 90, 103-117.
- PIRLET H., 1967b - Nouvelle interprétation des carrières de Richelle :
le Viséen à Visé. (deuxième note sur les calcaires de Visé).
Ann.Soc.Géol. de Belgique 90, 299-328.
- PIRLET H., 1968 - La tranchée de Berneau à Visé et la sédimentation Dévono-
carbonifère dans la région de Visé. (troisième note sur les cal-
caires de Visé).
Ann.Soc.Géol. de Belgique 90, 751-765.
- PIRLET H., 1970 - Compte-rendu de l'excursion de la Société Géologique
de Belgique tenue dans la région de Visé le 19 octobre 1968.
Ann.Soc.Géol. de Belgique 92, 455-467.
- REYNOLDS R.C., 1963 - Matrix corrections in trace element analysis by
Compton scattering .
Am. Mineral. 48, 1133-1143

- REYNOLDS R.C., 1967 - Estimation of mass absorption coefficients by Compton scattering : Improvements and extensions of the method.
Am. Mineral. 52, 1493-1502.
- SHELDON R.P., 1959 - Geochemistry of uranium in Phosphorites and Black Shales of the Phosphoria Formation.
US Geological Survey Bulletin 1084-D, 83-113.
- SINCLAIR A.J., 1976 - Applications of probability graphs in mineral exploration.
Special volume 4, the Association of Exploration Geochemists, Richmond Printers LTD, Canada, 95pp.
- SLANSKY M., 1964 - Généralités sur la sédimentation phosphatée et la recherche du phosphate.
Bull. B.R.G.M., 1, 43-61.
- SUMMERHAYES C.P., 1972 - Geochemistry of continental margin sediments from Northwest Africa.
Chemical Geology, 10, 137-156.
- THOMPSON M.E., 1954 - Further studies of the distribution of uranium in rich phosphate beds of the Phosphoria Formation.
US Geological Survey Bulletin 1009-D, 107-123.
- VAN TASSEL R., 1959a - Autunite, Apatite, Delvauxite, Evansite et Fuellite de la région de Visé.
Bull.Soc.Belge de Géol. 68, 226-250.
- VAN TASSEL R., 1959b - Strengite, Phosphosidérite, Cacoxénite et Apatite fibroradiée de Richelle.
Bull.Soc.Belge de Géol. 68, 360-370.
- WEDEPOHL K.H., 1974 - Handbook of geochemistry II.3. Uranium 92, K1-2
Springer.
- YOUNG E.J., MYERS A.T., MUNSON E.L. and CONKLIN N.M., 1969 - Mineralogy and Geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico.
Geological Survey Professionnal Paper, 650 D, D84-93.

ANNEXE

Description macroscopique des échantillons

I. ARGENTEAU

a. Grand piton rocheux et affleurements voisins. (D groupe 1).

- A/D2 : Brèche, très dure, à éléments phosphatés noirs.
La taille de ces éléments est de l'ordre de quelques centimètres.
- A/D3 : Un des éléments noirs extrait de la brèche (A/D2), feuilleté, nombreuses craquelures et trous remplis de calcite et/ou apatite (fluorescence verte).
- A/D4 - a et b : Brèche de couleur brun noir, à nombreux éléments noirs de différentes dimensions (la plus grande atteignant 3 cm) facilement reconnaissables par les nombreuses fractures qui les entourent. On note également la présence de nombreuses petites cavités remplies par différents minéraux observables sous la loupe.
- A/D4 - c : Roche noire, pyriteuse, à nombreux grains blancs d'apatite et couverte d'un enduit phosphaté (jaune clair).
- A/D170 - b : Élément phosphaté noir presque pur prélevé dans une brèche.
- A/D179 - a : Calcaire fin de couleur claire, à éléments phosphatés noirs de dimensions millimétriques.
- A/D179 - b : Calcaire fin de couleur claire ne contenant pas d'éléments noirs.

b. Affleurement de "la statue". (C group 1).

- A/C4 bis : Calcaire fin de couleur claire contenant de nombreux éléments phosphatés noirs de dimensions submillimétriques à millimétriques.
Les éléments, dont certains se détachent facilement en surface, sont dispersés très irrégulièrement dans la roche.
- A/C6
A/C27 : Calcaire fin de couleur claire ne contenant pas d'éléments noirs.
- A/C31 : Grès calcaire fin de couleur beige clair, à nombreux petits éléments phosphatés noirs submillimétriques à centimétriques. La roche est fortement fissurée et assez fragile.
- A/C33 : Grès calcaire gris, assez grossier, à mouchetures noires (les petits éléments phosphatés noirs de dimensions millimétriques sont répartis dans la roche).

- A/C34 : Brèche calcaire passant à une brèche calcaire à éléments phosphatés de dimensions submillimétriques à centimétriques et montrant très fréquemment des sections sub-rectangulaires à sub-carrées.
- A/C36 : Phosphorite, riche en pyrite et présentant en surface de nombreuses altérations multicolores (brun rouille, jaune orange,).
- A/C37 : Grès calcaire contenant d'abondants débris phosphatés noirs de dimensions très variables atteignant souvent plusieurs centimètres.
- A/C37 bis : Un des débris phosphatés de 1 à 2 cm³ isolé de l'échantillon A/C37.
- A/C38 : Brèche de couleur brun jaune, à nombreux débris phosphatés noirs de dimensions variables, caractérisé par la présence de nombreux grains de quartz et par quelques grains d'apatite.
- A/C40 : Brèche de couleur brun orangé. La taille des éléments est inférieure à celles des éléments de la brèche A/C38. La roche est assez altérée.
- A/C171 : Phosphorite (?) de couleur brun noir riche en pyrite, apatite, gypse et quartz.
- A/C176 : Phosphorite noire.

c. Le Site d'Argenteau. (B groupe 2).

- A/B2 : Brèche polygène, très dure, de couleur dominante brun orangé dans laquelle contraste de gros éléments gris foncé de tailles importantes variant de quelques cm² à plus d'une dizaine de cm².
Abondance de gypse, quartz et apatite.
- A/B3 : Brèche à ciment jaune vert contenant des fragments de shales noirs. Différents cristaux (autunite, torbernite, quartz, gypse, pyrite) sont présents.
- A/B4 - a, b et d : Shales noirs à taches violettes.
- A/B4 - c : Shales argileux brun violet à taches jaunes, vertes et noires.
- A/B5 : Shales et schistes calcaires rougeâtres se débitant en plaquettes.
Les parties les plus fraîches de la roche apparaissent encore grises. On reconnaît encore d'anciennes ampélites.
- A/B6 : Shales violets à taches noires, très fins et compacts.
- A/B7 : Shales noirs à taches violettes.

- A/B8 - a : Shales argileux brun clair, micacés, assez fins.
- A/B8 - b : Alternances de fines intercalations de shales violets et shales noirs.
- A/B8 - c : Shales noirs et violets.
- A/B9 : Shales argileux beiges.
- A/B12 : Shales noirs à fines intercalations argileuses et micacées.
- A/B13 : Shales noirs à très fines intercalations argileuses (1 mm).
- A/B14 : Shales argileux bruns et violets.
- A/B15 - a₁ : Shales noirs, très fins, à taches jaunes et vertes.
- A/B15 - a₂ : Shales noirs, à grandes taches violettes, s'écaillant facilement.
- A/B15 - b : Brèche polygène de couleur brune à éléments noirs répartis très irrégulièrement.
- A/B17 : Concrétion jaune clair et orangé de destinézite et de richellite. Après le séchage à 110° C à l'étuve, la concrétion s'est transformée en une poudre pulvérulente.
- A/B18 : Brèche polychrome à éléments noirs, à enduits jaunes, oranges bruns et verdâtres.
- A/B19 - a : Brèche jaune clair à éléments noirs, blancs (apatite) et enduits bruns.
- A/B19 - b : Roche polychrome en surface (partie altéré) formée d'un noyau (partie fraîche).
- A/B20 : Brèche de couleur brun jaune à nuances verdâtres contenant de nombreux fragments de couleur grise à noire tranchant viviment avec la couleur brune du ciment. Les dimensions des éléments sont assez variables (quelques millimètres à plusieurs centimètres). Sous la loupe, on peut également observer une grande variété de petits minéraux parmi lesquels on trouve en forte abondance le gypse. Ce dernier se présente sous forme de plus grands cristaux visibles à l'oeil nu.

II. RICHELLE

a. Pointements calcaires (F à J groupe 4).

- R/E120 - a : Roche scoriacée, vacuolaire, de couleur brun orangé, silicifiée, riche en limonite-goethite, en quartz et en phosphosidérite.
- R/E120 - b : Roche scoriacée, vacuolaire, noire et fragile (absence de silicification).

III. VISE

a. Carrière "M" des carrières de Richelle. (CM, group 7)

- VS - CM55C : Brèche de couleur grise à éléments gris foncé à noir souvent fissurés et de taille centimétrique.

b. Carrière "N" des carrières de Richelle. (CN, groupe 6)

- VS - CN 1 : Partie d'un ensemble très hétérogène assez meuble, formant un remplissage de karst et contenant des shales argileux brun violet et des petits éléments ocres assez durs.
- VS - CN 1bis : Petits fragments ocres prélevés dans la partie précédente (VS - CN 1).
- VS - CN 2 : Remplissage de karst : ensemble hétérogène, meuble, de couleur grise, renfermant de nombreux fragments de shales et quelques rares fragments ocres.
- VS - CN 3 : Remplissage de karst : ensemble hétérogène de couleur brune renfermant de nombreux fragments de shales de taille décimétrique.
- VS - CN 4 : Remplissage de karst : ensemble hétérogène de couleur brune contenant des fragments divers (shales gris et noir, petits blocs de phtanites, fragments ocres).
- VS - CN 5 : Remplissage de karst : ensemble hétérogène, meuble, le couleur brun orangé contenant des fragments divers (shales, phtanites, fragments ocres) de dimensions variables (quelques mm à plusieurs cm).
- VS - CN 6 : Remplissage de karst : ensemble hétérogène meuble, gris contenant en forte abondance des petits blocs de phtanites et de shales gris foncé à altérations multicolores.

c. Carrière "F" des carrières de Richelle. (CF, groupe 8)

- VS - CF 1 : Argilites brun violet, se débitant en plaquettes fines.
- VS - CF 2 : Argilites noires.
- VS - CF 4 : Argilites noires et violettes se débitant en plaquettes très fines et constituées d'une partie centrale plus noire et non altérée.
- VS - CF 5 : Phtanites caractérisés par des zones foncées et compactes alternant avec des zones claires et poreuses. Ces dernières témoignant de phénomènes de décalcifications.
- VS - CF 6 : Argilites gris foncé à traces brunes.
- VS - CF 8 : Argilites à points jaunes.

- VS - CF 12 : Argilites calcaires noires.
- VS - CF 13 : Argilites calcaires noires à traces blanches, roses et orangées.

IV. VALLON DE SOUVRE.

a. Affleurement du cheval. (CK, groupe 5)

- VS - CK 1 : Calcaire clair et fin présentant localement de nombreux petits éléments phosphatés noirs de dimensions millimétriques.

V. DALHEM

a. Affleurement de la Ferme du Chafour. (M. groupe 10)

- D/M - 10 -
11 et 12 : Calcaire clair présentant localement de petits éléments noirs, de dimensions millimétriques à centimétriques.

VI. BERNEAU

a. Affleurement de la Ferme du Longchamp. (P, groupe 13)

- Be/P1 : Brèche polygène et polychrome (rouge, jaune, vert ...) dans laquelle de nombreux éléments noirs et durs sont présents.

VII. BOMBAYE

a. Carrière de "la Folie". (O, groupe 12)

- Bo/o3 : Fragment de calcaire clair et fin contenant un gros élément phosphaté noir dont la surface est de 4 à 5 cm².

b. Série d'anciennes petites exploitations. (R, groupe 12)

- Bo/R2 : Calcaire à très petits éléments phosphatés noirs dispersés par endroits dans la roche.
- Bo/R3 : Calcaire clair et fin à rares petits éléments noirs de dimensions millimétriques.
- Bo/R4 : Calcaire riche en calcite de recristallisations à éléments phosphatés noirs légèrement feuilletés. En surface, on observe des petits grains de pyrite et/ou micas.
- Bo/R5 -
a, b et c : Calcaire dont les éléments phosphatés noirs montrent de fortes variations de dimensions (quelques millimètres à plusieurs centimètres). De nombreux joints stylolithiques sont également présents.

- Ro/R6 : Calcaire clair et fin à rares éléments phosphatés noirs de dimensions millimétriques.
- Ro/R7 : Calcaire à petits éléments phosphatés noirs dispersés dans toute la roche.
- Ro/R8 : Calcaire foncé, brèche, riche en cristaux de calcite, et ne contenant pas d'éléments noirs.
- Bo/R9 : Calcaire clair et fin contenant un élément phosphaté noir d'environ 5 mm².
- Bo/R10 : Calcaire clair et fin à nombreux petits éléments phosphatés noirs, dispersés dans toute la roche.
- Bo/R11 : Calcaire fin contenant quelques éléments phosphatés noirs et nombreuses veinules calcitiques.
- Bo/R12 : Calcaire à veinules calcitiques et ne contenant pas d'éléments phosphatés noirs.
- Bo/R16 : Calcaire à nombreuses veinules de calcite contenant quelques rares éléments phosphatés noirs.
- Bo/R17 : Calcaire très riche en calcite, contenant un gros élément phosphaté noir dont la taille est de plusieurs cm².
- Bo/R17 bis : Fragment de l'échantillon Bo/R17 ne contenant pas d'élément phosphaté.
- Bo/R18 : Même calcaire que Bo/R17.
- Bo/R18 bis : Fragment de l'échantillon Bo/R18 ne contenant pas d'élément phosphaté.
- Bo/R19 : Calcaire clair finement laminé ne contenant pas d'élément phosphaté noir.

