

N° d'ordre. 995

THESE

présentée à

LUNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE MENTION GEOLOGIE APPLIQUEE

par

Maurice NDZIBA

ANOMALIES RADIOMETRIQUES DES COUCHES DE PASSAGE DU VISEEN-NAMURIEN DANS LE BASSIN DE DINANT (Ardennes Belgique)-ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE

Soutenue le 4 novembre 1982 devante la Sommission d'Examen

Jury:

MM	Ch.	DELATTRE	Président
	Μ.	WATERLOT	Rapporteur
	JM.	CHARLET	Rapporteur
	R.	CONIL	Examinateur
	Y.	QUINIF	Examinateur

Travail effectué à : La FACULTE POLYTECHNIQUE de MONS (BELGIQUE) L'UER des SCIENCES de la TERRE de LILLE (FRANCE) avec l'aide de la REPUBLIQUE GABONAISE

50**376** 1982 241 A mon père et à ma mère le souvenir inoubliable de leur unique enfant.

A ma famille

AVANT - PROPOS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration étroite entre l'Université des Sciences et Techniques de Lille I et la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique) avec l'aide financière de l'Ambassade du Gabon en France. Avant d'exposer les résultats de mes recherches, c'est pour moi un agréable devoir que de remercier toutes celles et tous ceux qui y ont contribué.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à M. le Professeur J.-M. CHARLET (Faculté Polytechnique de Mons, Belgique) qui, après m'avoir accueilli dans son laboratoire, a mis à ma disposition les moyens nécessaires à la réalisation de cette étude et m'a fait profiter de l'expérience scientifique de son équipe de recherche. C'est lui qui m'a initié aux méthodes et techniques radiométriques. Sur le terrain, en sa compagnie, j'ai bénéficié de l'avis d'un spécialiste dans le domaine de la géologie minière. Je tiens aussi à remercier tout le personnel de son laboratoire pour l'excellente ambiance de travail qui y règne et qui a fortement influé sur la bonne marche de cette recherche. Je remercie en particulier R. BAYART pour son aide constante lors des manipulations chimiques.

J'exprime ma profonde gratitude à M. le Professeur M. WATERLOT (Université de Lille I). C'est grâce à lui que j'ai fait la connaissance de M. le Professeur CHARLET et que j'ai pu effectuer ce travail. Il a grandement facilité ma tâche en résolvant à tout moment les difficultés matérielles et financières qui entravaient la bonne marche de mes travaux. Sa compréhension, sa bienveillance, sa disponibilité et les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer, ont été les atouts principaux dont j'ai bénéficié auprès de lui.

M. le Professeur Ch. DELATTRE (Université de Lille I), en plus de son aide, de sa chaleureuse bienveillance pendant mon séjour au laboratoire, me fait l'honneur de présider ce jury. Je l'en remercie vivement et sincèrement.

M. Le Professeur R. CONIL (Université de Louvain-la Neuve, 3elgique) m'a aidé dans la détermination de la microfaune et la datation de mes échantillons. Pour cette contribution, pour son amabilité et pour avoir accepté de participer aux travaux de ce jury, je lui suis particulièrement reconnaissant. M. Y.QUINIF, Docteur ès Sciences (Faculté Polytechnique de Mons, Belgique), par son aide et ses conseils a largement contribué à la réalisation de ce travail. Il a accepté avec beaucoup d'amabilité de le juger, c'est pour moi l'assurance que mon travail bénéficiera de la critique d'un spécialiste de la géochimie de l'uranium. Qu'il en soit particulièrement remercié.

Ma gratitude va aussi à M. E. GROESSENS (Service Géologique de Belgique) à qui je dois la détermination de la microfaune de Conodontes.

Je remercie Melle M. MERCIER et Th. HOLTZAPFFEL (Laboratoire de Sédimentologie de Lille I) pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans le dépouillement des diffractogrammes des rayons X.

Je ne saurais oublier toutes les personnes qui ont participé à la réalisation technique de ce mémoire, Mme MASSINON pour la frappe, Mme BREBION pour le tirage, M. CARPENTIER pour les photos et M. PLUQUIN pour la reliure.

Luc DORCHIES, J.-M. DEGARDIN, Ch. BECK et Cl. BERQUER-GABOREAU ont été mes compagnons de tous les jours; leur présence et leur amitié m'ont aidé au long de ce travail. Je les remercie.

Je remercie ma femme et mes enfants pour le soutien affectif qu'ils m'ont apporté pendant tout notre séjour en France et particulièrement tout au long de ce travail de recherche.

Enfin, que l'Ambassade de la République Gabonaise en France trouve aussi l'expression de ma gratitude pour le soutien financier efficace qu'elle m'a apporté et qui m'a permis de mener à bien mon travail. Je remercie en particulier M. Mathias KOUNDI, Conseiller Culturel, de sa grande compréhension et suis très heureux qu'il ait pu se libérer pour assister à ma soutenance.

-:-:-:-:-:-:-:-:-:-

TABLE DES MATIERES

AVANT - PROPOS

TABLE DES MATIERES	
	pages
I - INTRODUCTION	1
2 - PRESENTATION DU SUJET	2
3 - ABSTRACT	3
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	
A - GEOCHIMIE DE L'URANIUM	7
l.Principales propriétés chimiques 2. Comportement géochimique en milieu sédimentaire	7 9
B - L'URANIUM DANS LES SCHISTES NOIRS	12
C - CONNAISSANCES ANTERIEURES SUR LA RADIOACTIVITE DES ROCHES DU BASSIN HOUILLER FRANCO-BELGE	15
DEUXIEME PARTIE : LE DOMAINE D'ETUDE	
Chapitre I : LOCALISATION ET CONTEXTE GEOLOGIQUE	10
I - SITUATION GEOGRAPHIQUE	19
II - CADRE GEOLOGIQUE	21
<pre>1. Introduction</pre>	21 21 21
2.1. Le Dinantien 2.2. Le Namurien 2.3. Les couches de passage du Viséen au Namurien	21 23 25
3. Tectonique	26
Chapitre II : PROSPECTIONS RADIOMETRIQUES ET ETUDE IN SITU DES	
PRINCIPALES ANOMALIES RADIOMETRIQUES	29
I - Prospection autoportée	29
1. Introduction	29
3. Résultats	29
II - Prospection scintillométrique	ונכ
1. Introduction	31
2. Caractéristiques du scintillomètre utilisé	32
4. Résultats	32
5. Convertions du "Total count" en unités de radioactivité	34

III - Levés radiométriques et descriptions des principales anomalies	35
l. Les anomalies situées dans les petits bassins orientaux	35
1.1. L'anomalie d'Ocquier	35 38
2. Les anomalies du synclinal d'Anhée	38
 2.1. L'anomalie de la carrière de Jaiffe à Warnant 2.2. L'anomalie de Poilvache 2.3. L'anomalie de Bioul 2.4. L'anomalie de Haut-le-Wastia 2.5. L'anomalie d'Anhée (carrière de "Bleu Belge" 	40 40 42 44 46
IV - Conclusions et implications sur l'orientation des recherches	48
TROISIEME PARTIE : ANALYSES EN LABORATOIRE	
Chapitre I : TECHNIQUES EXPERIMENTALES PARTICULIERES UTILISEES EN LABORATO	IRE 55
I – Généralités	55
 Introduction Conditionnement des échantillons 	55
II - Spectrométrie gamma	50 56
1. Introduction	56
 Appareillage Dosage des échantillons 	56 58
3.1. Principe	58
3.2. Etalonnage en énergie	58
3.4. Calcul des teneurs	58 62
III - Autoradiographie	63
1. Technique analytique	63 63
Chapitre II : ETUDE PAR SPECTROMETRIE GAMMA EN LABORATOIRE	65
I - Introduction	65
II - Résultats d'analyse et interprétations	65
III - E t ude de l'équilibre radioactif	71
IV - Relation entre (U) et radioactivité globale (in situ)	73
Chapitre III : DONNEES PETROGRAPHIQUES, MINERALOGIQUES et GEOCHIMIQUES DE LA SERIE DE PASSAGE DU VISEEN AU NAMURIEN (V ₃ c)	77
I - Etude des schistes du V_3^c	77
l. Données pétrographiques, minéralogiques et paléontologiques	77
<pre>1.1. Pétrographie 1.2. Minéralogie</pre>	77 77
a) Composition minéralogique argileuse b) Les minéraux non argileux	79 7 <u></u> 9
1.3. Conclusions 1.4. Données paléontologiques	79 80

J

2. Distribution des matières réductrices, des phosphates	80
2 1 Los matières réductrices (MR)	80
2.2. Les phosphates (P_2O_5)	80
2.3. Les carbonates $(CO_3^{})$	81
II - Etude des calcaires V ₃ b gamma - V ₃ c	83
l. Données pétrographiques, minéralogiques et paléontologiques	83
2. Reconstitution de l a série V₃c	88
3. Corrélations litho-biostratigraphiques entre le bassin d'Anhée et les petits bassins orientaux	88
4. Données chimiques	88
III - Les phosphorites	89
 Les straticules Les phosphates en grains Les nodules phosphatés 	90 90 90
 3.1. Pétrographie des nodules phosphatés 3.2. Etude minéralogique des nodules phosphatés 3.3. Essai de classification des nodules 3.4. Autochtonie des nodules phosphatés 3.5. Teneurs en matières réductrices, en P₂0₅ et en 	91 91 97 98
	98
4. Genese des phosphates	100
IV - Etude des niveaux argileux du V_3^{b} gamma et V_3^{c}	101
V - Etude des schistes namuriens	101
Chapitre IV : RELATIONS ENTRE TENEURS EN RADIOELEMENTS ET LES DONNES	
PETROGRAPHIQUES, MINERALOGIQUES ET GEOCHIMIQUES	103
I - Analyse de la distribution des radioéléments dans les faciès schisteux et argileux	103
 Généralités Représentation U-TH-K Analyse de la distribution des radioéléments dans les lits argileux du V₂b gamma et V₂c 	103 103 105
4. Analyse de la distribution des radioéléments dans les schistes V ₃ c	107
4.1. Etude de la relation Th-K ₂ 0	107
4.2. Application de la relation $U/K_2^0 = a (Th/U)^b$	109
5. Analyse de la distribution des radioéléments dans la série	
6. Synthèse de la distribution des radioéléments dans les faciès schisteux du bassin d'Anhée et les relations avec	111
la lithostratigraphie	111

II	- 1	Analyse	de la distribution des radioéléments dans	
TTT		hes car	de le distribution des rediciliments des	111
111	- 1	les nod	de la distribution des radioelements dans iles phosphatés	112
IV	- 1	Relation	ns entre les teneurs en uranium et la distribution	115
	0	des mat	ières réductrices et des phosphates	114
		l. Dans	les schistes et calcaires de la coupe de Warnant	114
		1.1.	Relation U-MR	114
		1.2.	Relation $U-P = 0$	114
		1.3.	Hypothèse génétique	118
			 a) création d'un milieu réducteur b) fixation de l'U par le MR c) précipitation et fixation de l'U par P₂O₅ 	118 118 118
	2	2. Dans	la coupe de Poilvache	
		2.1.	Relation U-MR	120
		2.2.	Relation $U-P_2O_5$	120
		3. Dans	les nodules phosphatés	120
		3.1.	Relation U-MR et $U-P_2O_5$	120
		3.2.	Etude autoradiographique	124
	(Conclus	ons	126
Chapitre	IV	: TRAIT	TEMENT SYNTHETIQUE DES DONNEES, L'ANALYSE FACTORIEL	LE,
			THE D ANALISE STATISTIQUE EN MULTIVARIABLE	129
I	- 1	Introduc	ction	129
II	- 0	Générali	tés sur l'analyse factorielle (A.F.)	129
III	- A	pplicat	ion de l'A.F	130
	1	. Princ	cipales étapes de l'A.F	130
	2	2. Résul	tats de l'A.F	131
		2.1.	Analyse de la coupe de Warnant	131
		2.2.	Analyse des nodules phosphatés	135
		2.4.	Analyse de la série des schistes du V ₃ c	137
		2.5.	Analyse des schistes et calcaires du V ₃ c	140
		2.6.	Etude de l'ensemble des faciès du V_3^c	140
	3	Concl	usions	142
CONCLUSIONS	GEN	ERALES		143
I	- 5	ynthèse	e des principaux résultats	143
II	- L	'uraniu	m dans le V ₃ c : hypothèse génétique	144
	1	. Conte	xte paléogéographique	144
	2	. Origi	ne de l'uranium	144
			a) origine pyroclastique	145
			b) origine liee a une alteration de socles grani- tiques	1/5
			-	1 46 ()

LISTE DES FIGURES

pages

Fig.	1	Phases principales de U dans une solution simple d'eau (d'après CAMERON, 1980)	B
	2	Système U - 0 ₂ - H 0 à 25°C et 1 atm (d'après HOSTETLER ² et al., 1962)	8
	3	Associations et emplacements de l'U dans les constituants des argiles marines (SWANSON, 1960)	9
	4	Localisation du domaine d'étude	19
	5	Carte géologique (Extrait de WATERLOT, 1945)	20
	6	Coupe dans le bassin d'Anhée (PIRLET, 1972)	27
	7	Enregistrement graphique de l'anomalie de Poilvache par la prospection autoportée	30
	8 à	14 Levés radiométriques des différentes anomalies	36 à 47
	15	Localisation des anomalies dans le bassin d'Anhée	49
	16	Schéma des opérations analytiques	55
	17	Schéma de l'installation de la spectrométrie gamma	57
	18 et	19 Etalonnage du spectre	59
	20	Spectre d'analyse par spectrométrie gamma d'un échantillon de schistes V ₃ c	66
	21	Famille radioactive de l'U ²³⁸	72
	2 2	Relation Uranium (ppm) - radioactivité globale (Ur)	74
	23	Diffractogramme de R X d'un schistes V ₃ c	78
	24	Corrélation entre le bassin d'Anhée et les petits bassins orientaux	86
	25	Corrélation entre les coupes de Warnant et de Modave	87
	26	Diffractogramme des R X d'un nodule phosphaté	92
	27	Calcul des teneurs en CO ₂ dans les phosphatés	94
	28	Relation kaolinite-illite dans les niveaux argileux	106 a
	29	Relation Th-K ₂ 0 dans les niveaux argileux	106 a
	30 31. 3	Relation U-kaolinite da ns les niveaux argileux 32 Représentation Th/U - U/K ₂ 0	106 а 106 b
	33. (34 Relation Th-K ₂ O dans les schistes du V_3^c	108
	35	Représentation Th/U - U/K $_2^0$	110
	36 	Relation entre U-Th-K et la composition minéralogique	112

	37 Distribution de U-P ₂ O ₅ - MR dans la coupe de Warnant	115
	38 Relation U-MR dans la coupe de Warnant	116
	39 Relation U-P $_{25}^{0}$ dans la coupe de Warnant	117
	40 Association minéralogique en fonction du pH et du Eh (d'après KRUMBEIN et GARRELS, 1952)	119
	41 Distribution de U-P $_{2}^{0}$ - MR dans la coupe de Poilvache	121
	42 Relation U-MR dans la coupe de Poilvache	122
	43 Relation U-P $_{2}^{0}$ dans la coupe de Poilvache	123
	44 Relation U-MR dans les nodules phosphatés	125
	45 Relation U-P $_{2}^{0}$ dans les nodules phosphatés	125
	46-47 Représentation des résultats de l'analyse factorielle, cas de la coupe de Warnant	132
	48-49 - Représentation des résultats de l'analyse factorielle, cas	de
	de la coupe de Poilvache	1-34
	50-51 Représentation des résultats de l'analyse factorielle, cas deschistes V ₃ c	136
	52-53 Représentation des résultats de l'analyse factorielle, cas des schistes et calcaires V ₃ c	138
	54-55 Représentation des résultats de l'analyse factorielle, cas général (schistes, calcaires et nodules phosphatés du V ₃ c)	139
	LISTE DES TABLEAUX	pages
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre 2 Série stratigraphique du Dinantien (Extrait de DUMON,1962) 3 Zonation du Namurien du Bassin de Dinant 4 Etalonnage du scintillomètre utilisé	pages 10 22 24 33
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61et 62
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61et 62 67 à 70
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61et 62 67 à 70 81
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61et 62 67 à 70 81 82
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61 et 62 67 à 70 81 82 84
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61 et 62 67 à 70 81 82 84 85
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61 et 62 67 à 70 81 82 84 85 89
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61 et 62 67 à 70 81 82 84 85 89 95
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	JQ JQ 22 24 33 61et 67 81 82 84 85 89 95 ¥9
Tableau	LISTE DES TABLEAUX 1 Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre	pages 10 22 24 33 61 et 62 67 à 70 81 82 84 85 89 95 95 95 95

3. L'uranium dans les termes carbonatés du V ₃ b 4. L'uranium dans le V ₃ c : hypothèse génétique de fixation	146 146
III - Intérêt de cette étude	147
IV - Perspectives ouvertes par cette étude	148
BIBLIOGRAPHIE	149

ANNEXES

 A_{l} - La diffraction des rayons X

A₂ - Analyses chimiques

A₃ - Technique d'extraction des conodontes

INTRODUCTION

1 - INTRODUCTION

Les gisements sédimentaires d'uranium peuvent être classés en deux grands groupes bien distincts.

Le premier groupe correspond au cas des gisements en roches perméables, caracterisés par la présence des minéraux uranifères bien développés distribués en concentrations locales dans les sédiments.

Le second groupe est constitué par des gîtes à minéralisation non exprimée. Ces gîtes indiquent, par leurs effets sur les scintillomètres que des enrichissements en uranium sont présents, sans que des minéraux uranifères spécifiques aient été observés. L'uranium y est à l'état diffus.

C'est à ce dernier groupe qu'appartiennent les schistes noirs et bruns du Viséen supérieur -Namurien inférieur qui ont fait l'objet de notre travail de recherche.

D'une manière générale, les gîtes à minéralisation non exprimée minéralogiquement sont jusqu'à ce jour inexploités du fait de leur faible teneur en uranium; ils sont délaissés et classés comme étant sans valeur dans les conditions économiques actuelles, au profit des gisements sédimentaires classiques.

Dans les quelques rares cas où ces gisements à faible teneur sont exploités, l'uranium est souvent récupéré comme un coproduit ou un sous-produit d'une autre substance minérale, à l'exception des schistes uranifères cambriens à intercalations de bogheads, de Suède, qui sont exploités depuis fort longtemps.

L'uranium est de nos jours de plus en plus récupéré comme sous-produit des phosphates servant à la fabrication des engrais.

Un autre exemple d'accumulations d'uranium à basse teneur, est constitué par les gisements de Witwatersrand en Afrique du Sud, avec la coproduction d'or et d'uranium, la radioactivité du minerai servant même de guide d'exploration pour sélectionner les meilleurs minerais aurifères.

-1-

Malgré le peu d'intérêt économique qu'ils présentent, tout au moins dans l'immédiat, les gisements sédimentaires de faible teneur principalement les schistes uranifères, n'en constituent pas moins un domaine d'étude très important, qui n'a jamais cessé d'attirer l'attention des géologues.

2 - PRESENTATION DU SUJET

Dans le cadre d'un contrat passé avec les Communautés européennes, l'équipe de recherche du laboratoire de Minéralogie de la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique) animée par M. le Professeur J.M. CHARLET, a effectué de 1979 à 1981 une vaste campagne de radioprospection autoportée couvrant l'ensemble du Paléozoique de la Belgique.

Une telle prospection visait surtout à rechercher les formations géologiques les plus aptes à contenir de l'uranium en définissant les anomalies géochimiques par rapport à la teneur moyenne de chaque formation.

Plusieurs anomalies radiométriques ont été ainsi mises en évidence dans des formations très variées, à travers le massif ardennais. Parmi ces anomalies, celles repérées dans le Bassin de Dinant, du fait de leurs intensités et de leur situation géologique particulière dans les couches de passage du Viséen au Namurien et aussi du fait de la discrimination de l'uranium comme principal radioélément responsable de l'activité enregistrée, semblaient présenter un intérêt certain.

Sur proposition de M. le Professeur J.M. CHARLET et en accord avec M. le Professeur M. WATERLOT, je fus chargé d'effectuer un travail de recherche approfondie de ces anomalies radioactives sur le terrain et en laboratoire, dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'Université des Sciences et Techniques de Lille (U.S.T.L.) et la Faculté Polytechnique de Mons (F.P. Ms).

Une telle étude devrait établir les relations entre les différentes anomalies et leur appartenance éventuelle à une même unité litho-stratigraphique radioactive, repérable à travers tout le bassin. Elle devrait, en outre, à l'échelle locale, indiquer les mécanismes ayant présidé à l'accumulation de l'uranium dans certains horizons de schistes noirs et bruns, aucun critère macroscopique déterminant ne permettant d'expliquer le phénomène.

A cette fin, un certain nombre d'anomalies choisies à travers le bassin, ont fait l'objet d'une étude radiométrique précise, à l'aide d'un scintillomètre, associée à une étude géologique de détail. Un échantillonnage très serré des coupes étudiées a été effectué en vue de réaliser une série d'analyses radiométriques, minéralogiques, pétrographiques et géochimiques en laboratoire.

L'ensemble de ces investigations a été élargi aux formations surmontant les anomalies ainsi qu'à leur substratum dinantien.

Les résultats de ces travaux seront précédés d'un rappel des grandes lignes de l'étape sédimentaire du cycle géochimique de l'uranium (paragraphe A). Dans le paragraphe B, nous présenterons un résumé bibliographique des connaissances actuelles sur les schistes uranifères, puis un bref historique de l'étude de la radioactivité dans le bassin houiller franco-belge (paragraphe C).

ABSTRACT

A radioprospection campaign in the belgian Paleozoic leads to the detection of many radiometric anomalies in the limestones and in the black and brownish shales of the transition-layers from Visean to Namurian.

The study of these rocks in laboratory by gamma-ray spectrometry shows that uranium is the main radioactive element responsible for these anomalies. The other radio-elements, Th and K^{40} are virtually absent.

Geological and geochemical investigations undertaken show that the uranium is fixed both on organic matters and phosphates which are particulary abundant in this sequence of transition. It looks as if the lack of detritic deposits in a starved basin, the quiet sedimentation environnement and the paleogeography are among the favorable factors leading to the precipitation of phosphates and the fixation of uranium.

An hypothesis explaining the processus of the fixation of uranium is suggested and the origin of uranium is discussed.

-3-

PREMIERE PARTIE:

GENERALITES

Le milieu sédimentaire constitue une étape très importante du cycle géochimique de l'uranium, élément que l'on trouve dans des formations pétrographiques très diverses, principalement dans des schistes noirs.

Pour comprendre le comportement géochimique de l'uranium en milieu sédimentaire et son piégage dans une grande variété de gisements, il est nécessaire de rappeler ses principales propriétés chimiques.

C'est aux travaux suivants : GAUTHIER (1961), MARTIN (1962), ROUZAUD (1979), SERRA (1979) que nous emprunterons l'essentiel de la matière de ce chapitre.

I - PRINCIPALES PROPRIETES CHIMIQUES DE L'URANIUM

L'uranium est un élément lithophile qui, dans la nature, se présente sous forme d'ion tétravalent U⁴⁺ et d'ion h'exavalent U⁶⁺.

- a) L'ion uraneux U^{4+} est peu soluble et peu mobile. Il a tendance à s'oxyder et à passer à la valence 6 en donnant UO_4^{2-} et $U_2O_7^{-2-}$. Par conséquent, on ne le trouve que dans des conditions particulières; on ne le trouve que dans des eaux hydrothermales sulfureuses (Eh \lt 0, pH \lt 4). Pour pH ightharpoon 4, U⁴⁺ forme l'oxyde UO₂ insoluble ou uraninite (0.SERRA, 1979),
- b)L'ion hexavalent U_{2}^{6+} n'existe pas en solution, mais il donne immédiatement l'ion complexe uranyle U_{2}^{++} . Ce dernier est stable en solution, mais il n'existe effectivement que dans les milieux très acides (pH \leq 2) et pour Eh > 0. (fig. 1). L'augmentation du pH entraîne une hydrolyse de U_{2}^{++} avec formation soit d'ions $U_{2}O_{5}^{++}$ ou $U_{3}O_{8}^{++}$, soit d'ions complexes de type $[U_{2}(OH)_{2}U_{3}]_{n}$ (pour 2 \leq pH \leq 5). A pH = 5, il y a hydrolyse et précipitation de la schoepite (3 UO_{3} , 7H₂O) (fig. 2).
- c) L'hydrolyse amphotère qui dérive de UO₂⁺⁺ a un caractère d'acide très faible et a tendance à former avec beaucoup d'anions (CO₃⁻⁻, SO₄⁻⁻, PO₄⁻⁻, F⁻) des complexes parmi lesquels les uranylcarbonates et les uranylsulfates sont les plus importants.

-7-

Cette facilité de former les complexes caractérise l'uranium en solution (J. MARTIN, 1962). Les complexes uranylcarbonates: bicarbonatés $\begin{bmatrix} UO_2, (CO_3)_2 \end{bmatrix}^{2^-}$ et tricarbonatés $\begin{bmatrix} UO_2, (CO_3)_3 \end{bmatrix}^{4^-}$ prédominent pour les pH > 6, tandis que les uranylsulfates : bisulfatés $\begin{bmatrix} UO_2, (SO_4)_2 \end{bmatrix}^{2^-}$ et trisulfatés $\begin{bmatrix} UO_2, (SO_4)_3 \end{bmatrix}^{4^-}$ sont stables pour un pH $\leq 2,5$.

Au voisinage de la neutralité prédominent les complexes organiques humiques et fulviques.

La précipitation de l'uranium intervient sous l'action des modifications de pH, Eh, pression et température. Sa fixation peut avoir lieu par des hydroxydes de fer, de manganèse, des minéraux argileux, desphosphates et des matières organiques.



-8-

2 - COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DE L'URANIUM EN MILIEU SEDIMENTAIRE

L'altération des sources primaires de l'uranium par les eaux circulantes a pour effet de le libérer sous sa forme hexavalente, stable en solution aqueuse dans une large gamme de pH

En solution dans les eaux circulantes, l'uranium est dissout et s'y trouve soit sous forme de complexes ioniques, soit sous forme colloïdale.

Ces eaux circulantes continentales, souterraines ou sup**erfi**ci**e**lles sont à la fois un agent de mobilisation et de transport de l'uranium.

Après un déplacement plus ou moins important, il est susceptible de se déposer syngénétiquement avec certains sédiments et de se fixer épigénétiquement dans tous les types de roches, y compris les formations sédimentaires non encore consolidées comme les alluvions ou les dépôts marins récents.

Certains minéraux réfractaires tels que : monazites, zircon, xénotine etc.. s'altèrent peu *in situ* mais sont réduits par attrition durant leur transport avec les sédiments clastiques. Ils se déposent avec leur contenu uranifère dans certains endroits privilégiés.



Fig. 3 — Schéma montrant les associations et emplacements de l'uranium dans les constituants communs des argiles marines noires; l'uranium est représenté par des points noirs (d'après SWANSON, 1960).

-9-

L'uranium est extrêmement dispersé et inégalement distribué dans les roches sédimentaires à tel point qu'il est difficile de fixer des valeurs moyennes.

La teneur en uranium des sédiments varie en fonction de nombreux facteurs parmi lesquels on peut citer :

- la nature du sédiment et sa situation particulière,
- les conditions physico-chimiques qui existaient lors de la sédimentation,
- le climat, le relief et la végatation qui facilitent plus ou moins les mouvements,
- enfin, les apports uranifères qui ont pu s'effectuer par adsorption ou par remplacement isomorphique après le dépôt des matériaux clastiques (fig. 3).

Tableau 1.- Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre (d'après CLARK <u>et al.</u>, 1966)

Type de roche	K (%)	U (p)	pm)	Th (ppm))	Th/U		Th/K
	Moyenne	Moyenne	Valeurs extrêmes	Moyenne	Valeurs extrême s	Moy.	Val. extr.	Moyenne
Sédiments arénacés	1,4	1	0,5-2	3	2-6	3		2,1
Sédiments argileux	2,7	4	1-13	16	2-47	4	1-12	5,9
Schistes noirs	2,7	8	3-250	16	-	2	Eĉart large	5,9
Calcaires	0,3	2	1-10	2	-	1		6,6
Latérites	bas	10	3-40	50	8-132	5	Ecart large	
Moyenne de l'écorce terrestre	2,1	3		12		4		

En guise de conclusion à ce paragraphe, on peut dire que chaque milieu physico-chimique, chaque environnement géologique se caractérise vraisemblablement par sa propre concentration moyenne en uranium. Cependant, à titre indicatif, nous nous référerons aux valeurs moyennes du tableau n° 1.

B – L'URANIUM DANS LES SCHISTES

L'uranium dans les schistes noirs a été découvert pour la première fois en 1893 dans les schistes alunifères marins d'âge cambrien, du Sud de la Suède (FIX, 1958). Depuis lors, d'autres gisements uranifères de même type ont été trouvés en de nombreuses régions du globe, principalement aux Etats-Unis (Chattanooga, Kansas, Ohio, Texas ...).

Ils sont d'origine marine (U.S.A.) ou d'origine lacustre (Hérault, France) et sont d'âges géologiques variés, pour la plupart paléozoïques. Ils ont été étudiés à des degrés divers : les différents travaux regroupés et résumés par C.E. FIX (1958)dans sa synthèse bibliographique sur les schistes noirs, ceux de GAUTHIER (1961), MARTIN (1962)et ceux, beaucoup plus récents, de DEGENS (1977), BELL (1978), ROUZAUD (1979) et HERBOSH (1980) pour ne citer que ces quelques exemples, fournissent beaucoup d'informations sur ce sujet. Leur nombre considérable témoigne en outre de l'importance que les géologues n'ont jamais cessé d'accorder aux schistes noirs en général et à leur contenu en uranium.

Bien que chaque gisement de schistes riches en uranium semble se présenter comme un cas d'espèce en raison, soit des conditions géologiques et paléogéographiques, soit des conditions de gisement, l'examen bibliographique permet cependant de dégager pour ceux-ci quelques propriétés importantes communes.

1) D'après la caractéristique inhérente à ce type de gisement, l'uranium est dispersé à travers la masse du sédiment et aucune forme minéralogique uranifère connue ne peut être identifiée.

2) Il existe des corrélations positives entre la teneur en uranium et la teneur en chacun des deux principaux constituants suivants :

- a) la matière organique,
- b) le matériel phylliteux.

La validité de ces deux relations a toujours été vérifiée dans le cas des schistes uranifères d'origine marine.

-12-

D'autres corrélations positives ont pu être établies entre l'uranium et la concentration en oxydes et hydroxydes métalliques, entre l'uranium et les sulfures ou entre l'uranium et les phosphates dans certains bassins de sédimentation.

2-1. Relation Uranium-Matière organique

Le matériel organique auquel est associé l'uranium dans les schistes noirs provient en général d'organismes végétaux qui accumulent dans leurs tissus des teneurs relativement importantes d'uranium.

I.A. BREGER et M. DEUL (1956) suggèrent trois possibilités d'association uranium-matériau organique :

- a) la matière organique agit comme réducteur et transforme l'ion uranyle U0₂⁺⁺ soluble en ion uraneux insoluble;
- b) les sulfures résultant de la décomposition de la matière organique sont eux-mêmes des agents réducteurs, U0₂⁺⁺ passe à l'état U⁴⁺;
- c) la matière organique est un précipitant chimique pour l'ion UO2++.

Cette dernière possibilité d'action a retenu l'attention de nombreux chercheurs qui ont envisagé deux modes de rétention de l'uranium :

- le premier fait intervenir la matière organique comme support physique, le mécanisme de la fixation de l'uranium n'est alors qu'une adsorption;
- le second est un phénomène purement chimique : l'uranium forme des sels ou des complexes.

Chacune de ces hypothèses semble se vérifier lorsqu'on examine divers gisements où l'uranium est accompagné des matériaux organiques.

Les études plus récentes de DEGENS et al. (1977) sur les anomalies en uranium des sédiments de la Mer Noire montrent que les teneurs en uranium et en matière organique varient dans le même sens. L'uranium y serait lié aux organismes planctoniques, principalement aux coccolithes qui semblent présenter une affinité particulière pour cet élément.

2-2. Relation Uranium-Matériel phylliteux

En 1952, J.H. BROWN et W.D. KELLER ont étudié des schistes noirs et démontré au moyen d'analyses que l'uranium est fixé sur l'argile et non sur la matière organique mais ils en ignorent le mode de fixation. S. GOLDSTAUD et R. WEY (1955) montrent par des travaux expérimentaux qu'en milieu acide (pH \leq 2) des argiles de type déterminé (Montmorillonite H et kaolinite H) absordent les ions uranyles U0₂⁺⁺, proportionnellement à la capacité d'échange de cations.

M. GAUTHIER (1961) insiste également sur le rôle des phyllites. Pour cet auteur, tout sédiment finement divisé, en contact avec des solutions complexes d'uranyle, provoque, au voisinage de la neutralité, la précipitation presque totale des composés uranifères. La structure de ces composés et peut-être même leur composition, dépendent de la surface de l'adsorbant.

En résumé, nous retiendrons avec M. GAUTHIER (1961)que les données actuelles quoique déjà nombreuses ne suffisent pas pour envisager une hypothèse unique expliquant la concentration de l'uranium dans les schistes noirs. De trop nombreuses possibilités s'offrent à l'esprit, mais il est actuellement impossible de faire un choix.

Compte tenu de ce fait, nous avons entrepris méthodiquement la vérification des différentes hypothèses de formation des schistes uranifères précédemment citées, dans le cas précis des schistes bruns et noirs du bassin de Dinant que nous avons étudiés. Le but poursuivi est de déterminer les facteurs géologiques qui ont controlé la distribution de leur contenu en uranium et finalement de proposer une hypothèse générale sur la formation des schistes uranifères à l'échelle de tout le bassin.

		 	**	<u>т</u>	З	5	A	N	C	Ľ	5		A	N	Т	E	ĸ	T	E	U	R	E	S		S	U	R			
L	A	R	A	D	I	0	A	С	Т	I	V	I	Т	Е		D	E	S		R	0	С	H	E	S					
D	U	B	A	S	S	I	N		I	1 0) (J :	E I]	1	EJ	R	ł	? H	2 4	4 1	1 (: () -	-]	B 1	E I	5 (3	E

Lés premières recherches sur la radioactivité des roches du houiller franco-belge remontent au moins à l'année 1943 avec les travaux de Mlle G. MICHEMBLE. En effet, ayant entrepris l'étude de la radioactivité des sources thermales du Nord de la France, G. MUCHEMBLE fut amenée à en rechercher l'origine dans les roches de la région.

A partir d'une série d'analyses effectuées méthodiquement, suivant un programme dressé par P. PRUVOST, sur des échantillons prélevés à travers le terrain houiller et son substratum, l'auteur aboutit aux conclusions suivantes :

- J) Dans le terrain houiller, les horizons schisteux à fossiles marins, quel que soit leur niveau stratigraphique, sont anormalement radioactifs, ce qui n'est pas le cas des dépôts d'eau douce qui les encadrent;
- parmi ces roches marines, ce sont les schistes ampéliteux de l'Assise de Bruille de la base du Namurien qui sont les plus radioactifs. Ainsi s'expliquerait la radioactivité des eaux thermales de St Amand-les-Eaux qui proviennent de cet horizon;
- le calcaire carbonifère immédiatement subordonné à ces schistes radioactifs présente une radioactivité très faible;
- 4) enfin, suivant en direction la bande des schistes radioactifs de Bruille le long du bord septentrional du bassin, l'auteur montre l'existence d'une augmentation d'Ouest en Est de la radioactivité.

En 1946, J. CHALARD se référant aux investigations sus-citées, insista sur les applications de l'étude de la radioactivité des horizons marins du houiller dans certains levés cartographiques et surtout en stratigraphie houillère. Ainsi, Ch. BARROIS ayant montré que ces horizons marins très minces et à grande extension géographique constituaient des repères stratigraphiques intéressants, les ingénieurs des mines qui les appréciaient les firent rechercher systématiquement. Mais en raison des difficultés à les déceler au milieu des formations épaisses et monotones du terrain houiller, il avait semblé intéressant de chercher à les repérer par leurs propriétés radioactives. En 1957, R. LEGRAND met en évidence l'existence des brèches radioactives aux environs de Visé (Province de Liège, Belgique) au moyen d'un scintillomètre portatif. Ces brèches radioactives ne sont pas des brèches sédimentaires, mais des roches remaniées se rencontrant à la base des formations schisteuses à quelques mètres seulement au-dessus du calcaire carbonifère. Leur radioactivité serait liée à la présence des phosphates concentrés de façon secondaire dans le Namurien.

En outre, cet auteur signale l'existence d'une anomalie radioactive à Blaton (Belgique) dans les roches constituant la base du houiller, anomalie qu'il s'efforcera de repérer à la base de l'ensemble du terrain houiller

En 1959 , J. JEDWAB découvre à Argenteau, encore dans la province de Liège, une série de formations uranifères à minéraux radioactifs bien exprimés et bien définis.

Beaucoup plus récemment, dans le cadre de la relance de la prospection minière dans la "Vieille Europe", HERBOSCH, WRITTE et PREAT (1979) ont entrepris une prospection scintillométrique systématique de la région de Visé . Celle-ci a permis de déceler un grand nombre d'anomalies radioactives qui ont été étudiées dans leur contexte géologique régional.

Dans la même perspective, la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique) et l'Université Catholique de Louvain (Belgique) ont respectivement effectué de 1979 à 1981 une campagne de prospection autoportée et une prospection géochimique couvrant l'ensemble du Paléozoïque belge. Ces campagnes trouvent actuellement leur suite logique dans toute une série de travaux faisant l'objet de thèses de doctorat.

DEUXIEME PARTIE:

LE DOMAINE D'ETUDE



CHAPITRE I - LOCALISATION ET CONTEXTE

GEOLOGIQUE

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le domaine intéressé par ce travail appartient à la partie nord du synclinorium de Dinant. Il constitue une grande unité longitudinale qui s'étend d'Est en Ouest, à quelques kilomètres au sud du synclinorium de Namur, de part et d'autre de la Meuse dinantaise (fig. 4). Comme l'ensemble du massif ardennais, il est boisé et son relief lentement rajeuni par des mouvements épéironégiques de la fin du Tertiaire a permis aux cours d'eau de conserver les sinuosités qu'ils dessinaient sur la pénéplaine mio-pliocène (G. WATERLOT, 1945) . Les vallées encaissées donnent souvent des belles coupes naturelles des terrains paléozoïques, la principale étant celle de la Meuse.



Fig. 4 LOCALISATION DU DOMAINE D'ETUDE



-20-

II - CADRE GEOLOGIQUE

1. Introduction

S'étendant entre les massifs cambriens de l'Ardenne (Rocroi, Serpont, Stavelot) au Sud et le passage en surface de la grande faille du Condroz (faille du Midi du Nord de la France) au Nord, le Bassin de Dinant correspond géologiquement à un grand synclinorium. Celui-ci se prolonge au-delà de la frontière française où il est recouvert en discordance par les formations mésozoïques du bassin de Paris. Vers l'Est, il se relève axialement et dans son prolongement apparait le massif calédonien de Stavelot (MICHOT, 1980).

Les formations géologiques impliquées dans sa structure sont de compositions lithologiques variées; elles vont de l'Eodévonien jusqu'au Namurien inférieur.

Au bord sud du synclinorium, on rencontre uniquement la série dévonienne; elle y est très épaisse et complète de la base au sommet. Dans le domaine qui nous concerne, c'est le Dinantien qui occupe de vastes étendues. Le Namurien, conservé dans le coeur étroit de petits bassins synclinaux qui jalonnent l'axe du grand pli synclinorium (fig. 5) est en concordance de stratification sur le Dinantien.

La géologie générale du synclinorium de Dinant et singulièrement celle de son bord nord est devenue classique, à la lúmière de nombreux travaux dont il n'a cessé d'être l'objet depuis le siècle dernier.

Aussi ne retiendrons-nous dans la brève présentation qui.suit, que les traits essentiels stratigraphiques et tectoniques des formations carbonifères auxquelles se rapporte le thème de notre recherche.

2. Stratigraphie du Carbonifère

2.1. Le Dinantien

La stratigraphie du Dinantien belge est conçue sur un schéma en assises et sous-assises dans lequel les concepts chrono-bio, voire lithostratigraphiques se confondent parfois. De même, les symboles Tnl, Tn2a, ... V₃, V₃^c employés notamment dans la légende de l'ancienne carte géologique de Belgique ont une signification différente selon les auteurs et les aires géographiques auxquelles ils se rapportent (GROESSENS, 1974). Dans le souci d'éviter

LE VISEEN : V

-22-

C - LE VISEEN SUPERIEUR ou Assise de Bioul et de Warnant (v_3)		
V _{3c} - Schistes et phtanites de Warnant	13	m
Calcaires, calschistes et schistes de Warnant - therts	7	m
V - Banes supérieurs d'Anhée "Marbre Bleu Belge" avec cherts Petit Granit de Thon.	30	m
V - "Grande brèche" - Oolithe supérieure,cherts à la base 3a	30	m
B - LE VISEEN MOYEN ou Assise de Namèch e (V ₂)		
V_{2b} - Bancs inférieurs d'Anhée - Petite brèche, cherts au sommet	45	m
V _a - Calcaire de Neffe - Oolithe moyenne- dolomie	25	m
A - LE VISEEN INFERIEUR ou Assise de Dinant (V ₁)		
V _{1b} - Calcaire et Domolie de Sovet, Brèche de l'Ourthe et de la Vesdre-cherts	90	m
V - Marbre noir de Dinant, Oölithe, calcaires divers	85	m:
<u>LE TOURNAISIEN : Tn</u>		
C - LE TOURNAISIEN SUPERIEUR ou Assise de Celles (Tn3)		
Tn3c - Calcaire de Leffe et de Praire avec cherts	56	m
Tn3b - "Petit Granit" Calcaire de Pont-à-Rieux, Dolomie	23	m
Tn3a - Calcaire d'Yvoir avec cherts	20	m
B - LE TOURNAISIEN MOYEN ou Assise de Maredsous (Tn2)		
Tn2c - Caleschistes de Maredsous	11	m
Tn2b - Calcaires de Landelies	10	m
Tn2a - Schistes	7	m
A - LE TOURNAISIEN INFERIEUR ou Assise d'Etroeungtet Hastière (Tr	u1)	
Tnlb - Calcaire et schistes d'Hastières		
Tnla - Calcaires, calcschistes et psammites d'Etroeungt(Strunien) et de Comblain-au-Pont	25	m
	437	M =====

Les épaisseurs données sont tirées de la "Géologie des Carrières" (1962).

toute confusion possible, nous adopterons la nomenclature utilisée par les auteurs des derniers schémas de zonations stratigraphiques (sensu CONIL, PIRLET, LYS, 1967) . C'est à ces mêmes auteurs que nous emprunterons l'essentiel des données exposées dans ce paragraphe.

Comme au Dévonien, le synclinorium de Dinant a été, au Dinantien, le siège d'une sédimentation continue. Aucune lacune n'y est connue de la base au sommet. Il s'agit d'une série essentiellement calcaire avec des faciès très variés. Elle admet toutefois quelques intercalations dolomitiques, des niveaux de cherts, des schistes ou des calcschistes. Cette série complète a permis le choix de nombreux stratotypes, parastratotypes et coupes de référence . Le Dinantien affleure largement dans le bord nord du synclinorium, en concordance de stratification sur son substratum schisto-psammitique famennien. La présence de nombreuses carrières abandonnées, atteste qu'il a été activement exploité en particulier sa partie supérieure dénommée "Marbre Bleu Belge".

Dans la région de Bioul, localité située au nord de Dinant, la série stratigraphique peut être résumée comme l'indique le tableau 2.

2.2. Le Namurien

Dans le synclinorium de Dinant, le Westphalien est totalement absent. Quant au Namurien, il n'est conservé que dans le synclinal d'Année d'allure complexe et dans le coeur étroit de quelques autres petits synclinaux (Florenne, Assesse, Ocquier, Modave ...). Il s'agit d'une série détritique formée de schistes de teintes variées, noir, gris ou brunâtres, plus ou moins silicifiés, parfois gréseux à faune marine. On y trouve aussi quelques niveaux de phtanites. Ce Namurien est presque stérile en charbon (+).Il est en concordance géométrique avec le Dinantien. Malgré cette concordance apparente, le passage du calcaire carbonifère à ce régime marin à dépôts uniquement terrigènes est marqué en Belgique et singulièrement dans le synclinorium de Dinant, par une lacune de sédimentation. Les arguments en faveur de l'existence de cette

-23-

⁽⁺⁾ MICHOT(1980) signale que des petites veines de houille ont été anciennement exploitées dans la zone E₂a à Eumorphoceras bisulcatum du bassin de Dinant et dans le Massif de Theux.

lacune sont basés sur la macro et sur la microfaune (BOUCKAERT et HIGGINS, 1963). Sur le terrain, ni discordance, ni ravinement, ni rubéfaction continentale n'ont pu être observés dans les coupes étudiées.

Dans le domaine qui nous intéresse, cet hiatus ne correspondrait qu'au sous-étage basal E_1 du Namurien. L'érosion ayant fait disparaître de grosses masses des dépôts namuriens les plus jeunes, seules les trois zones du sous-étages E_2 y ont été identifiées paléontolggiquement (Tableau 3).

La zone basale ou E_{2a} reconnue dans tous les petits bassins du synclinorium regroupe les formations namuriennes les plus anciennes reconnues en Belgique. Elle est constituée essentiellement de schistes de teinte variable dont l'épaisseur atteint 130 m dans le bassin d'Anhée. BOUCKAERT et HIGGINS (1963) y ont récolté les fossiles caractéristiques Eumorphoceras bisulcatum et Cravenoeras cowlingense dans la carrière souterraine de Bioul et dans la carrière de Jaiffe à Warnant.

		Alportien (H ₂)	Ht.prereticulatus(H2c) H .undulatum (H2b) Hd.proteus(H2a))) ERODE)
N		Chokierien (H _l)	H . beyrichianum (H1b) H . subglobosum (H1a)	
IE	assin		N . nuculum (E2c)	(N. nuculum (N. stellarum
U R	ien du B Dinant	Arnsbergien(E ₂)	Ct. nitidus (E2Ъ)	(Ct.nititoides (Ct.nitidus (Ct.edalense
W	Namur j de		E.bisulcatum(E2a)	(E. bisulcatum (C. cowlingense
N		Pendleien (E _l)	C. malhamense (Elc) E. pseudobilingue (Elb) C. leion (Ela))) LACUNE))
VISEE	N	V3c = Assise de	Bioul et Warnant	

Tabl. 3.- Zonation du Namurien du Bassin de Dinant
Cette zone **E** a a été également identifiée à l'extrémité ouest du 2 synclinorium de Namur dans la région de Blaton (BOUCKAERT *et al.*, 1961). Il semble que c'est à partir de cette dernière que la mer aurait envahi dès la base du Namurien (E₂a) le bassin de Dinant (VAN LECKWISCK, 1964).

- La zone moyenne ou E₂b a été aussi identifiée dans tous les petits bassins namuriens; elle atteint 70 m d'épaisseur dans la région d'Anhée. Elle est formée de phtanites et surtout de schistes renfermant quelques fossiles index tels que Eumorphoceras bisulcatum (variété ?) et Cravenoceras nitidum.
- La zone supérieure ou E₂c a été mise en évidence grâce à la présence de Nuculoceras nuculum dans des faciès toujours schisteux, constituant le sommet de la série détritique. En raison de l'érosion qui l'a affectée, il est très difficile d'évaluer les épaisseurs.

Stratigraphiquement, l'ensemble de cette série détritique namurienne appartient à l'assise de Chokier, équivalent de l'assise de Bruille du Nord de la France.

2.3. Les couches de passage du Viséen au Namurien

Les formations sédimentaires définissant le Viséen terminal et sa transition au Namurien sont connues dans le synclinorium de Dinant sous la dénomination de "couches de passage". Il s'agit d'un terme général regroupant divers horizons d'une série mixte schisto-calcareuse. L'existence de ces couches de passage généralement confondues avec la base du Namurien a surtout été mise en évidence par F. DEMANET (1938), qui a créé pour elles un terme spécial V_{3c}^{c} de la légende stratigraphique belge. Ce V_{3c}^{-a} été subdivisé par le même auteur, grâce à la fréquence des goniatites caractéristiques, en deux parties : le V_{3c}^{c} inférieur et le V_{3c}^{c} supérieur.

A Warnant où cette subdivision a été établie, le V_{3c} inférieur atteint 7m de puissance; il est formé de calcschistes noirs et des calcaires gris à cherts. Le V_{3c} supérieur épais de 8m environ est à l'état de schistes de teintes variées de phtanites et de quelques bancs calcaires plus ou moins siliceux.

En dehers du synclinorium de Dinant et de la région de Blaton (extrémité Ouest du synclinorium de Namur), le V_{3c} est mal connu, soit que ses équivalents se présentent sous un faciès calcaire persistant, soit que, déjà sous un faciès terrigène, il ait été confondu avec le Namurien, soit qu'une lacune

-25-

complète ou partielle, existe à ce niveau (F. DEMANET, 1938). Le V_{3c} constitue là où il existe, un ensemble bien individualisé entre le calcaire carbonifère franc et la série uniquement terrigène namurienne.

Au cours des vingt dernières années, le V_{3c} a été l'objet de nombreuses recherches principalement biostratigraphiques, basées sur la macrofaune et, surtout sur la microfaune (BOUCKAERT et HIGGENS, 1963 et 1968; VAN LECKWICK, 1964).

Nous avons, pour notre part, entrepris l'étude détaillée de ces couches de transition du point de vue de leur radioactivité. Elles constituent avec l'extrême base du Namurien ou zone E_{2a} le support géologique de nos recherches dans le synclinorium de Dinant.

3. Tectonique

C'est vers la fin du Westphanien que la déformation majeure du bassin de Dinant a commencé sous l'influence de l'orogenèse hercynienne. Mais certains mouvements précurseurs se sont produits très tôt : l'existence de la "Grande Brèche" viséenne (V_{3a}) et surtout le passage de la sédimentation calcaire franche du Viséen supérieur à la sédimentation principalement terrigène quoique encore marine, du Namurien, sont généralement considérés comme des manifestations représentant le contre-coup de la phase sudète (BOUROZ, 1963).

Les plissements caractéristiques de la tectonique du bassin correspondent à la phase asturienne. Celle-ci a redressé et plissé les terrains primaires en petits anticlinaux et synclinaux disposés en bandes parallèles au sein d'un grand synclinorium de Dinant. Elle a en outre créé plus au Nord le synclinorium de Namur et fait surgir le Silurien de la ride du Condroz, disloqué par la grande faille directionnelle du Midi qui fait chevaucher le synclinorium de Dinant sur celui de Namur, au flanc sud renversé.

Tels qu'ils apparaissent sur la carte géologique (fig. 5), ces plis hercyniens décrivent une large courbure concave vers le Nord, disposition absolument identique à celle des plissements calédoniens. Cette disposition d'après P. FOURMARIER (1954) est d'origine profonde et très ancienne; elle est un trait dominant non seulement de l'évolution géologique du territoire de la Belgique, mais de toute l'Europe Occidentale et peut apparaître comme un héritage précambrien.

-26-

Dans le domaine du flanc nord du synclinorium qui nous intéresse ici on observe une série de failles parallèles à la direction des plis et qui donnent à cette partie du bassin une structure qualifiée "d'imbriquée" par P. FOURMARIER (1954). Ce sont des accidents de style cassant qui parfois recoupent transversalement certains plis. Parmi les plus importants, on peut retenir la faille de Mettet, la faille d'Yvoir visibles dans la vallée de la Meuse et les failles de la coupe du Hoyoux dans la partie Est du synclinorium.

Dans le bassin houiller d'Anhée, la tectonique est cependant extrêmement complexe. D'après PIRLET (1971), la structure d'ensemble du bassin d'Anhée pourrait être interprétée comme un grand pli anticlinal couché vers le Nord, et formé par les niveaux du Viséen supérieur, V_{3b} , V_{3c} et du Namurien. Ces derniers auraient formé une invagination lors de la progression de l'olistholithe vers le Nord au-dessus du substratum par l'intermédiaire de l'olistrome qui jouerait le rôle de zone de glissement (fig. 6).

Toujours d'après l'auteur, postérieurement, le plissement varisque aurait plissé ces ensembles par des plis à plans axiaux redressés. Dans une phase tardive de cetorogenèse, les flancs normaux et inverses auraient été faillés par toute une série de petites failles peu inclinées au Sud.



Fig. 6.- Coupe dans le bassin d'Anhée d'après PIRLET, 1972.

CHAPITRE II - PROSPECTIONS RADIOMETRIQUES ET ETUDES IN SITU DES PRINCIPALES ANOMALIES RADIOACTIVES

I - PROSPECTION AUTOPORTEE

1. Introduction

La couverture radiométrique de notre domaine de recherche a été réalisée dans le cadre général de l'importante campagne de radioprospection autoportée du Paléozoïque de la Belgique, effectuée par la Faculté Polytechnique de Mons, de 1979 à 1981.

2. Appareillage et techniques de prospection

La prospection autoportée a été effectuée à l'aide d'un appareillage monté sur un véhicule tous-terrains LAND-CRUISER chassis long et comprenant :

- un détecteur de rayonnement du NaI (T1) modèle NAI 110, diamètre 6",
 épaisseur 4", volume 1854cc, fixé à l'arrière du véhicule, à 1,30 m
 du sol et incliné de 45°:
- un spectromètre à fenêtres type Geometrics DRGS 1002;
- un enregistreur à plumes Mars 6 permettant la discrimination des énergies caractéristiques de l'U, du Th et du K⁴⁰. Les données sur ces trois fenêtres énergétiques ainsi que le taux de comptage global (ou "Total Count" (TC) sont enregistrés en continu par voie analogique couplé au déplacement du véhicule.

Tout le réseau routier a été systématiquement parcouru, les itinéraires ayant été choisis dans la mesure du possible perpendiculaires à l'orientation générale des grandes structures géologiques.



Les enregistrements graphiques des intensités de rayonnement sur les voies U - Th - K^{40} - TC ont été systématiquement codés par pas de 100 m, en vue d'un repérage précis lors du dépouillement des résultats.

3. Résultats

La prospection radiométrique autoportée a fourni quatre résultats fondamentaux :

- a- elle a repéré à travers le bassin un nombre important de sites renfermant une anomalie radioactive, lesquels ont motivé un travail de recherche plus approfondie. Parmi ces anomalies, on peut citer l'anomalie de Bioul Centre, l'anomalie de Haut-le-Wastia et celle de Poilvache, dont l'enregistrement graphique est représenté par la fig.7;
- b- de l'examen des enregistrements graphiques de ces anomalies, il ressort que l'uranium est partout le principal radioélément responsable de l'activité mesurée (fig.7);
- c- La série détritique surmontant le calcaire viséen s'est avérée comme la principale formation apte à contenir des radioéléments, principalement de l'uranium;
- d- le Dinantien, avec une teneur moyenne de 3,45 ppmU apparaît comme relativement uranifère, pour des formations carbonatées aussi bien cristallisées.

II - PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE

1. Introduction

Dans le but d'obtenir une couverture radiométrique plus complète de l'ensemble du bassin, nous avons entrepris une prospection complémentaire pédestre, à l'aide d'un scintillomètre. Tous les secteurs et tous les itinéraires inaccessibles à la prospection autoportée ont été ainsi systématiquement fouillés.

La prospection autoportée ayant défini les schistes de teinte variable de la série détritique reposant sur le Dinantien comme le seul ensemble susceptible de renfermer de l'uranium, c'est en direction de ceux-ci que la prospection scintillométrique a été le plus orientée. Les formations calcaires immédiatement subordonnées à cette série détritique ont également fait l'objet d'investigations détaillées.

2. Caractéristiques du scintillomètre utilisé

Le scintillomètre portatif que nous avons utilisé est de marque Geometrics, modèle GR-101A. Il est particulièrement adapté à la prospection au sol et répond aux conditions suivantes : c'est le plus léger des scintillateurs, comparé au SCINTREX; il est étanche à l'humidité, résistant aux chocs et aisément transportable. C'est un coffret métallique comportant les éléments fondamentaux suivants :

- un scintillateur constitué par un cristal NaI,
- un photomultiplicateur,
- un dispositif électronique comportant une alimentation en tension continue (2 piles de 1,5 V),
- un dispositif permettant l'emploi de plusieurs sensibilités utiles lorsqu'on est en présence des formations très radioactives,
- un milliampéremètre sensible qui permet la lecture sur une graduation appropriée de la radioactivité enregistrée en coups par seconde (c/sec),

- une alarme.

3. Technique de prospection

Les mesures ont été faites dans les mêmes conditions géométriques pour tous les levés radiométriques effectués : en maintenant le détecteur à hauteur du genou et en parcourant lentement les affleurements.

Le calibrage du scintillomètre a été régulièrement fait sur la station d'étalonnage construite à cet effet par la Faculté Polytechnique de Mons. Cette station est composée de quatre dalles de deux mètres de diamètre et de 0,65 m d'épaisseur. Trois dalles ont été respectivement "dopées" en U (36 ppm), Th (102 ppm) et K (8,19 % K₂0), tandis que la dernière correspondant au béton, sert de référence pour le bruit de fond (tableau 4).

_ 	Etalonnage o	ce : Geometrics	GR 101 A	
Dalles Dates	Béton	Th	U	К
09/02/81	20	210	150	60
14.05.81	12	150	100	45
25.6.81	10	200	130	60
21.09.81	22	200	140	60

Tab1. 4.-

4. Résultats

La prospection scintillométrique a confirmé et complété les résultats de la prospection radiométrique autoportée par la découverte de nouvelles anomalies radioactives, toujours liées aux schistes et accessoirement aux calcaires. Ces anomalies se situent toutes dans les formations de la série de passage Viséen-Namurien. Si elles semblent ponctuelles, c'est simplement à cause des mauvaises conditions d'affleurement au niveau du passage Viséen-Namurien, toujours en dépressions. L'importante tranchée de la route Namur-Marche, située à quelques kilomètres au Nord de la localité d'Assesse illustre parfaitement cette situation. Cette tranchée expose les terrains d'âge namurien (BOUCKAERT, 1963); le contact Viséen-Namurien étant situé dans une dépression et largement recouvert par les éboulis, l'anomalie radiométrique n'a pu être décelée. Celle-ci a cependant été repérée un peu plus à l'Ouest, dans une tranchée de chemin de fer. En général, c'est dans les affleurements et, surtout dans les anciennes carrières de "Marbre Bleu Belge" où le Namurien et son contact avec les calcaires viséens sont les mieux observables, que les anomalies

ont été repérées. Parmi les plus significatives du point de vue de leur intensité radioactive, on peut citer :

- l'anomalie de la carrière de Jaiffe à Warnant,

- l'anomalie de la carrière souterraine à Bioul,

- l'anomalie de la carrière du "Bleu Belge" à Anhée,

- l'anomalie de Château de Senène au sud d'Amhée.

Dans les petits bassins orientaux, trois anomalies d'intensités très élevées ont été mises en évidence dans les tranchées de route : ce sont : l'anomalie de Modave et l'anomalie d'Ocquier. La troisième correspond à l'anomalie d'Assesse, située dans une tranchée de chemin de fer.

Nous présenterons le levé radiométrique de chacune de ces anomalies, accompagné d'une description lithologique des formations géologiques encaissantes.

5. Conversion du "Total-Count" en unité de radioactivité

Afin de standardiser les résultats du comptage global ou "Total-Count" (T.C.) nous avons adopté l'unité de radioactivité, Ur (+) recommandée par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (I.A.E.A.).

5.1. Détermination du bruit de fond ("Back ground")

Le bruit de fond représenté par le rayonnement cosmique et les descendants du radon fixés sur les poussières atmosphériques a été considéré comme constant. Il a été déterminé à partir des dalles de calibrage de la Faculté Polytechnique de Mons et évalué à 10 coups/seconde pour le scintiflomètre utilisé.

La convertion coups par seconde - unité de radioactivité répond à la formule :

Ur =
$$\frac{N-n}{a_U}$$
 N = "Total count" (en c/sec.)
n = bruit de fond = 10c/sec.
 a_U = coefficient de calibrage du scintillo-
mètre, calculé à partir de la dalle
"dopée" en uranium.

 (+) Une formation géologique avec une unité de concentration en radioélément
 (en Ur) produit la même réponse qu'une source identique contenant une partie par million d'uranium (1 ppm U) en équilibre radioactif. Sachant que : U $(ppm)_{dalle U} = 36 ppm U$, on obtient :

$$a_{U} = \frac{TC_{D} - TC_{B}}{U (ppm)}$$

$$TC_{U} = Total count mesuré sur la dalle d'uranium : 150 c/sec.$$

$$a_U = \frac{150 - 20}{36} = 3,61$$
 TC_B = Total count mesuré sur la dalle
de béton = 20 c/sec.

finalement : Ur =
$$\frac{N-n}{a_{II}}$$
 = $\frac{N-10}{3,61}$

III - LEVES <u>RADIOMETRIQUES</u> ET DESCRIPTIONS DES PRINCIPALES ANOMALIES

Au terme de la prospection autoportée et de la prospection scintillométrique pédestre, la suite des recherches a été orientée vers une prospection extrêmement fouillée aux alentours des principales anomalies repérées. Le but poursuivi est de mettre en évidence la distribution de la radioactivité en liaison avec les caractéristiques géologiques des formations traversées. Un levé radiométrique de détail de chaque coupe a été ainsi effectué au scintillomètre.

Les anomalies considérées se répartissent géographiquement en deux groupes :

1. Les anomalies situées dans les petits bassins orientaux

Dans cette partie Est du synclinorium, nous avons retenu deux anomalies : celle de Modave et celle d'Ocquier. L'anomalie d'Assesse située le long d'une tranchée de chemin de fer très fréquentée n'a pu être levée en raison des difficultés d'accès et de très mauvaises conditions d'affleurement.

1.1. L'anomalie d'Ocquier (fig. 8)

Elle est située dans une tranchée de la route menant à Modave, à moins d'un kilomètre de la localité d'Ocquier. Elle est liée à des schistes brunâtres fortement altérés à leur base, dans la zone de





Fig 9-Levé radiométrique de l'anomalie de MODAVE et distribution de j'U.

B. S.

contact avec les formations calcaires viséennes. Celles-ci sont datées du V_{3b} par leur microfaune de foraminifères. Une recherche poussée des conodontes dans ces faciès s'est avérée totalement négative. Un niveau de phtanite apparaît en relief au milieu de la partie altérée de la série schisteuse. Nous avons également noté la présence d'un seul niveau de nodules de phosphates à radiolaires dans les faciès non altérés. Au-dessus de cette série viennent des schistes noirs très fins et silicifiés qui passent, par endroits, à des faciès gréseux.

L'anomalie détectée dans cette coupe se situe à trois mètres audessus des calcaires V_{3b} . Elle présente un pic très important, avec un comptage global de 500 c/sec. environ (soit 125 Ur); par contre, son extension verticale est très faible, avec seulement 50 cm d'épaisseur. De part et d'autre de l'anomalie, la radioactivité décroît rapidement pour se situer en-dessous de 100 c/sec. (25 Ur) dans les schistes noirs et gréseux du sommet de la coupe et dans les calcaires viséens sousjacents (fig.g).

1.2. L'anomalie de Modave (fig. 9_)

Elle est située au NE de Modave sur une tranchée de route (coordonnées Lambert : X = 217,22; y = 126,67). Elle présente de nombreuses analogies géologiques et radiométriques avec celle d'Ocquier :

- liée aux schistes bruns à nodules de phosphates,
- radioactivité très élevée avec un comptage global de 560 c/sec.
 (152 Ur), cependant,
- faible extension verticale avec seulement 60 cm d'épaisseur,
- de part et d'autre la radioactivité est faible.

Contrairement à Ocquier, ici, il n'a pas été possible d'observer le passage aux formations calcaires, en raison de l'existence d'un important hiatus d'observation. Cependant, les calcaires les plus proches sont comme à Ocquier, datés du V_{3b}, par les foraminifères. La recherche des conodontes a été également vaine.

2. Les anomalies du synclinal d'Anhée

C'est le plus important des bassins namuriens du synclinorium de Dinant. • Nous y avons dénombré près d'une dizaine de sites renfermant une anomalie radioactive, dont cinq ont fait l'objet d'un levé radiométrique détaillé.



-39-

2.1. L'anomalie de la Carrière de Jaiffe à Warnant

C'est dans cette carrière située à quelques centaines de mètres de la localité de Warnant que l'on observe le mieux la transition Viséen-Namurien. C'est la coupe de référence des "Couches de passage" ou V_{3c} étudiée par F. DEMANET (1938). En 1968, R. CONIL a repris l'étude de cette coupe. Dans les 8 m correspondant au V_{3c} supérieur il a récolté des goniatites caractéristiques de cet ensemble : Goniatites spiralis, Goniatites granosus, Goniatites newsoni et Goniatites subcircularis. BOUCKAERT et HIGGINS (1968) se sont également intéressés à la même coupe, du point de vue de sa microfaune de conodontes.

Nous avons effectué un levé radiométrique détaillé de cette coupe en relation avec sa succession lithostratigraphique. Celui-ci indique un enrichissement global en radioéléments de l'ensemble du V_{3c} supérieur (fig. 10). La courbe de radioactivité présente cependant de nombreuses fluctuations dans la traversée des différents lithofaciès et même dans la traversée des horizons apparemment homogènes. Ces fluctuations sont particulièrement marquées dans les cinq mètres de base, constitués par une alternance de bancs peu épais de calcaires fins et siliceux, des phtanites et des schistes noirs renfermant de nombreux niveaux de phosphorites sous forme de nodules ou de straticules. Nous avons recueilli une abondante microfaune de conodontes dans les derniers bancs calcaires. Le seul genre caractéristique est le genre Gnathodus, avec entr'autres des formes commutatus, Paragnathodus mononodosus P1.VII

A trois et à cinq mètres du dernier banc calcaire, on note l'existence de deux horizons très radioactifs associés à un ensemble de schistes de teintes variées, bien feuilletés et renfermant de nombreux niveaux de nodules de phosphates riches en radiolaires. Le V_{3c} inférieur entièrement situé dans un puits d'accès difficile a échappé à nos investigations dans cette carrière.

2.2. L'anomalie de Poilvache

Près des ruines de l'ancien château de Poilvache, à quelques kilomètres au Sud d'Yvoir, sur la rive droite de la Meuse, la prospection autoportée a repéré une importante anomalie dans des schistes de teinte brunâtre, silicifiés et se débitant en feuillets assez grossiers. Leur mauvais état d'affleurement dû à leur forte





altération, surtout à la base, ne permet pas d'observer le passage aux faciès calcaires. La coupe et le levé radiométrique effectués présentent alors des discontinuités du fait de l'existence de nombreux hiatus d'observation (fig.₁₁). La répartition de la radioactivité présente, comme à Warnant, de nombreuses sinuosités. Le comptage global mesuré atteint 360 c/sec. (97 Ur) au niveau du pic le plus important. Comme à Warnant, cette coupe est dans son ensemble radioactive, sauf dans les faciès schisteux noirs, fins et siliceux constituant le sommet de la série où le taux de comptage régresse considérablement.

2.3. L'anomalie de Bioul (carrière souterraine)

La carrière souterraine de Bioul encore appelée "Carrière de la Noire Terre" présente une coupe continue depuis les calcaires viséens francs du V_{3b} jusqu'aux termes namuriens les plus jeunes (E_{2c}). La partie accessible de la carrière correspond aux couches de passage Viséen-Namurien. On distingue :

- à la base, 3 m de bancs calcaires de 30 à 50 cm d'épaisseur, des calcschistes, des schistes siliceux et quelques niveaux de phtanites;
- sur cet ensemble repose une importante série de schistes bruns et surtout de schistes noirs, très broyés, épais de 9 m environ et renfermant plusieurs niveaux de nodules de phosphates à radiolaires;
- le reste de la série est à l'état de schistes noirs siliceux et fins qui s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres et qui sont pratiquement inaccessibles.

La courbe de la radioactivité enregistrée au scintillomètre (fig. 12) montre comme partout dans ce bassin, de nombreux pics malgré l'allure homogène des sédiments dans la partie prospectée. Les pics de plus forte intensité se situent comme dans les coupes précédentes à quelques mètres seulement du dernier banc calcaire viséen. Celui-ci a, par ailleurs, livré une abondante microfaune de conodontes, la même qu'à Warnant.



Fig. 12- Levé radiométrique de l'anomalie de BIOUL.

2.4. L'anomalie de Haut-le-Wastia

L'affleurement renfermant cette anomalie correspond à une importante tranchée de la route Warnant-Haut-le-Wastia, à quelques centaines de mètres de cette localité. Il expose l'ensemble des terrains namuriens et les faciès de transition avec le Viséen sousjacent.

Après un dégagement des éboulis qui encombraient l'affleurement, une étude géologique et radiométrique de cette série a pu être réalisée (fig. 13).

On distingue à la base un ensemble des schistes brunâtres assez altérés. En raison de cette altération, leur contact avec le calcaire carbonifère n'est pas visible. On rencontre cependant dans la zone altérée de gros blocs métriques de calcaires dans lesquels une abondante microfaune de conodontes caractéristiques du V_{3c} a été récoltée. On y trouve également, en relief, un niveau de phtanites qui rappelle très fortement ceux présents dans la coupe d'Ocquier, dans l'Est du bassin. Les calcaires sous-jacents qui sont en place et qui affleurent plus au Sud sont datés V_{3b} par leur microfaune de foraminifères. Lorsqu'on remonte la série, les schistes sont de moins en moins altérés et deviennent progressivement siliceux et même gréseux. Parallèlement, ils s'enrichissent en phosphates. Ceux-ci se présentent essentiellement sous forme de nodules de 1 à 5 cm de diamètre ou sporadiquement sous forme de grains ou de straticules, surtout visibles en lames minces.

A partir du niveau altéré (a), on distingue (fig. 13) :

- b) des schistes bruns à brachiopodes et goniatites, particulièrement riches en nodules de phosphates à radiolaires; dans ces derniers, nous avons pu observer quelques goniatites;
- c) des schistes noirs siliceux, parfois gréseux et renfermant de nombreux niveaux de nodules de phosphates. Ces nodules de phosphates comme partout dans le bassin sont particulièrement riches en radiolaires. On y note aussi la présence d'un niveau d'argile blanchâtre de quelques centimètres d'épaisseur. Les schistes se débitent en feuillets assez fins. Nous y avons récolté des brachiopodes, des empruntes de plantes et surtout des goniatites difficilement déterminables ;



-45-

- d) un niveau de schistes gris et brunâtres, grossièrement feuilletés et dessinant un pli synclinal. Au niveau de la faille (F₂), ils sont très fortement broyés. Entre les feuillets on remarque la présence d'un minéral phosphaté néoformé, à structure fibro-radiaire : la crandallite;
- e) des schistes très noirs, fins et siliceux occupant le sommet de la coupe et d'âge namurien.

L'ensemble de cette série schisteuse est affecté par deux petites failles d'importance locale distantes de 6 m et situées dans la partie centrale de la coupe.

Le levé radiométrique effectué au scintillomètre montre une courbe avec de nombreuses fluctuations et qui met en évidence l'existence de quatre pics radioactifs très saillants liés à des schistes noirs. Il est à noter que dans cette coupe, les niveaux schisteux les plus radioactifs sont aussi ceux qui renferment les phosphorites, principalement à l'état de nodules phosphatés. Le taux de comptage global mesuré varie entre 100 c/sec. et 300 c/sec. (soit 25 Ur à 80 Ur). Trois des quatre pics radioactifs sont séparés par les deux petites failles. Il semble que ces quatre pics correspondent en fait à deux anomalies seulement (A, et A,) dont l'une (A₂) est deux fois répétée par les failles (F₁ et F₂) (fig.13).

2.5. L'anomalie de la carrière de "Bleu Belge" à Anhée (fig. 14)

Cette carrière est située sur la rive gauche de la Meuse au bord de la route conduisant à Dinant. Elle a l'avantage d'exposer l'ensemble du V_{3c} inférieur que nous n'avons pu observer ailleurs. Celui-ci est formé essentiellement des calcaires de faciès variés, surtout crinoïdiques, en bancs très épais et en position renversée. Leur datation est basée sur les foraminifères, principalement du groupe Archaedisadae. Ces bancs calcaires sont séparés par des niveaux d'argiles jaunes et blanches, des schistes noirs ou des calschistes de 5 à 30 cm d'épaisseur.

Dans les deux derniers bancs calcaires, qui appartiennent déjà au V_{3c} supérieur, nous avons dégagé une abondante microfaune de conodontes dont le genre le plus caractéristique est le genre Gnathodus. La plupart d'espèces rencontrées à Warnant y ont été retrouvées. Grâce à cette microfaune de conodontes, nous avons pu faire une corrélation avec la coupe de Warnant dans le but de reconstituer la coupe complète de l'ensemble

-46-

-47-



Fig. 14 -

du V_{3c} dans le bassin d'Anhée.

D'autres corrélations ont été effectuées entre les différentes coupes étudiées, grâce aux conodontes et aux foraminifères. Il est à remarquer que dans le V_{3c} , les faciès à conodontes sont généralement dépourvus de foraminifères et réciproquement.

Le levé radiométrique réalisé au scintillateur indique une radioactivité relativement faible dans les calcaires; par contre, celle-ci augmente sensiblement dans les niveaux de faciès détritiques, intercalés entre les bancs calcaires.

IV - CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS SUR L'ORIENTATION DES RECHERCHES

Au terme de cette première partie d'investigations, il est possible de tirer quelques conclusions qui ont des implications sur l'orientation du travail.

- 1. Les anomalies radiométriques les plus importantes du bassin de Dinant sont toutes distribuées dans des schistes noirs ou brunâtres et dans quelques rares niveaux calcaires. Elles appartiennent toutes à une même unité stratigraphique, le V_{3c} supérieur, et se situent à quelques trois ou quatre mètres du dernier banc calcaire viséen.
- 2. L'ensemble des schistes noirs, fins et plus ou moins siliceux d'âge namurien qui surmontent ce niveau radioactif est, par contre, très faiblement radioactif. Les calcaires viséens sous-jacents sont également relativement pauvres en radioéléments.
- 3. De l'Ouest à l'Est du bassin, partout où les conditions d'affleurement permettent l'observation du contact Namurien-Viséen, nous avons systématiquement repéré une anomalie radioactive : celle-ci présente donc un caractère stratiforme et continu à l'échelle du bassin.
- 4. De l'étude comparée de la distribution de la radioactivité dans les différentes coupes étudiées se dégagent quelques caractères distinctifs entre le bassin d'Anhée et les petits bassins orientaux.
 - Dans le synclinal d'Anhée, le V_{3c} supérieur est radioactif dans son ensemble, bien que la distribution de la radioactivité n'y obéit à aucune loi simple. Toutefois, dans chaque coupe étudiée, il a été possible de



distinguer au moins deux pics très saillants. Le taux de comptage global, certes élevé, ne dépasse pas les 400 c/sec. (108 Ur).

 Dans les petits bassins orientaux, le niveau renfermant l'anomalie est très fortement réduit, avec une extension verticale de quelques dizaines de centimètres seulement.

Le levé radiométrique montre un pic unique correspondant à l'anomalie. Le comptage global nettement plus élevé que dans le bassin d'Anhée est partout supérieur à 500 c/sec. (soit 135 Ur).

- 5. Le caractère hétérogène de la distribution de la radioactivité est général, même dans des faciès schisteux homogènes. A l'échelle macroscopique, il est pratiquement impossible de distinguer un échantillon de schiste radioactif d'un échantillon de schiste non radioactif.
- 6. La présence quasi-exclusive des phosphates dans cette série de transition constitue une autre caractéristique de celle-ci.
- 7. Dans le bassin d'Anhée, le plus important, mais aussi le plus intéressant du point de vue radiométrique, il a été en outre possible d'inventorier de manière exhaustive toutes les anomalies et de localiser avec précision tous les affleurements, même ceux ne renfermant pas d'anomalie (fig. 15).

Les six premiers points exposés ci-dessus soulèvent de nombreuses questions. La principale interrogation se rapporte à l'enrichissement préférentiel du V_{3c} supérieur en radioéléments alors que les formations qui l'encadrent en sont pratiquement dépourvues. On peut, en outre, se demander quels sont les mécanismes qui expliquent les variations verticales de la radioactivité à l'échelle de la coupe et surtout les variations latérales d'Ouest en Est, de l'épaisseur et de l'intensité de la radioactivité de l'anomalie stratiforme du V_{3c} ?

Il est probable que les particularités du milieu de sédimentation, les changements paléogéographiques de la fin du Dinantien, la lacune de sédimentation de la base du Namurien (absence de la zone E_1) et le phénomène de condensation qui affecte cette série V_{3c} (celle-ci étant plus accentuée à l'Est qu'à l'Ouest) ont eu une influence considérable sur la concentration des radioéléments. Pour tenter d'apporter quelques éléments de réponse à ces interrogations, quelques coupes parmi celles décrites plus haut ont été choisies, en raison de leur situation géographique particulière et de leurs caractéristiques géologiques et radiométriques, en vue d'une étude fine en laboratoire. Un échantillonnage extrêmement serré (tous les 30 cm en moyenne) de ces coupes a été effectué, en prenant soin chaque fois de cerner les anomalies.

TROISIEME PARTIE:

ANALYSES EN LABORATOIRE

CHAPITRE I - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

P	A	R	Т	I	С	U	L	I	E	R	E	S		t	J	T	I	L	I	S	E	E	S	E	N
							Į		1	B () I	R	A	T	0			RE	2						

I - GENERALITES

1. Introduction

L'approche des questions soulevées par l'enrichissement préférentiel en radioéléments du Viséen supérieur nécessite l'emploi des techniques pluridisciplinaires. La figure 16 rassemble les principales méthodes et techniques d'investigations utilisées et montre le schéma général des opérations analytiques. Toutefois, nous ne décrirons dans ce chapitre que les méthodes radiométriques utilisées en laboratoire. Les méthodes plus classiques comme la diffraction des Rayons X et les analyses chimiques seront développées en annexe.



Fig. 16.- Schéma des opérations analytiques

2. Conditionnement des échantillons

C'est une opération délicate dont dépendent les résultats de certaines analyses.

Tous les échantillons récoltés ont été soumis au même traitement. L'échantillon lavé et débarrassé des croûtes organiques qu'il peut porter est séché à l'étuve pendant plusieurs heures. Après prélèvement d'un fragment de roche devant servir à la confection des lames minces et des surfaces polies, il est concassé, broyé puis transformé en une poudre homogène de granulométrie inférieure à 0,23 mm (tamis de 65 mesh).

II - LA SPECTROMETRIE GAMMA

1. Introduction

Après l'étude géologique et radiométrique in situ, le travail en laboratoire a commencé par la détermination et le dosage par spectrométrie gamma des principaux radioéléments responsables de l'anomalie radiométrique stratiforme repérée dans le V₃c du bassin de Dinant.

La spectrométrie gamma est une méthode qui utilise la radioactivité des roches. Par l'analyse du rayonnement émis, elle permet d'identifier et de doser simultanément les radioéléments U-Th-K⁴⁰ et d'étudier l'équilibre U-Ra, dans un échantillon de composition inconnue. Par rapport aux méthodes chimiques, elle présente le grand avantage d'être non destructrice, d'où la possibilité de récupérer l'échantillon dosé et de l'utiliser dans d'autres types d'analyse.

La spectrométrie appliquée aux Sciences Minérales s'est fortement développée au cours de ces dernières années et notamment dans le laboratoire de Minéralogie de la Faculté Polytechnique de Mons, en Belgique, où un appareillage très moderne a été mis au point. Celui-ci est exploité par une équipe de chercheurs sous la direction du Professeur J.M. CHARLET C'est dans ce laboratoire et au sein de cette équipe que nous avons traité et analysé nos échantillons.

2. Appareillage de spectrométrie gamma (fig. 17)

L'installation de spectrométrie gamma de la Faculté Polytechnique de Mons est une chaine de mesure composée de :

⁻ un détecteur à cristal scintillant NaI (T1) 4" x 2" couplé à un tube photomultiplicateur;









- un étage d'amplification,
- un analyseur multicanaux (400 canaux) qui classe les impulsions issues du photomultiplicateur selon les amplitudes ou encore les photons gamma en fonction de leur énergie.

La sortie de ces résultats se fait actuellement sur une imprimante donnant le listing des mesures (une sortie sur bande magnétique couplée à un microordinateur est prévue).

<u>Remarque</u> : Le détecteur est placé dans un château de plomb (50x50x70 cm, épaisseur du Pb = 5 cm revêtu intérieurement de 0,5 cm de Cu). L'enceinte de mesure est thermostatisée à 21°C de manière à assurer la reproductibilité des comptages.

3. Dosage des échantillons

3.1. Principe

Le but est de doser en une seule mesure le K, le Th et l'U d'un échantillon et d'étudier l'équilibre entre l'uranium et le radium. L'énergie des gammas (ou la position des raies dans le spectre) est fonction de la nature du radioélément. Le nombre des gammas d'énergie déterminée (ou la hauteur des raies) est fonction de la concentration en radioéléments. On utilise la partie moyenne énergie du spectre jusque 1,6 MeV. De cette manière, non seulement la raie du K à 1,460 MeV s'y trouve, mais encore la discrimination reste suffisamment bonne pour individualiser les raies à basse énergie, jusque 100 keV (voir fig. 18, Etalonnage en moyenne énergie).

3.2. Etalonnage en énergie (fig. 18)

L'étalonnage permet de calibrer la chaîne de mesure en utilisant la raie du C_S 137 qui doit être positionnée sur un canal déterminé de l'analyseur (171 ou 172).

3.3. Etalonnage en concentration

a) Choix des raies

Pour le dosage U-Th-K, les raies suivantes ont été choisies : - pour le potassium, la raie à 1,460 MeV : c'est la seule raie photoélectrique du K₄₀- largeur = canaux 351-380;

- pour le thorium, la raie à 930 keV - largeur = 225-255;







- pour l'uranium, en vue de la vérification permanente, trois raies ont été choisies : la raie à 295 keV (canaux 77-85), la raie à 610 keV (canaux 150-170) et celle à 1120 keV (270-300). La raie à 184 keV (47-58) dépendant à la fois de l'U²³⁵ et du Ra²²⁶ est utilisée pour le calcul de l'équilibre radioactif.

b) Droites de corrélation (fig. 19)

Dans le but d'établir les relations entre l'intensité des raies photoélectriques et les teneurs des roches en U-Th-K, des étalons ont été fabriqués par le laboratoire de la Faculté Polytechnique de Mons. Cette fabrication a été menée de manière à éliminer l'effet de matrice, en se plaçant dans les conditions d'absorption analogues à celles rencontrées dans les roches. Le choix des étalons a été effect**ué** de manière à couvrir le domaine de teneurs habituelles des roches les plus courantes :

- pour le potassium de 0 à 6 % exprimé en K₂O,
- pour l'uranium de 0 à 30 ppm exprimé en U métal,
- pour le thorium de O à 25 ppm.

Il faut ajouter encore que, dans un spectre gamma contenant simultanément les radioéléments U - Th - K, la raie photoélectrique d'un radioélément déterminé est influencée par le rayonnement Compton des émetteurs de plus haute énergie. C'est ainsi par exemple que la raie à 0,610 MeV de l'uranium est influencée par la raie à 950 keV du Th et la raie à 146 MeV du K. Des corrélations ont donc été systématiquement établies pour chaque étalon, entre sa teneur en radioéléments et les intensités des différentes raies choisies. Le dosage précis fait appel à la réalisation d'un système d'équations linéaires.

En tenant compte du bruit de fond (régulièrement enregistré) et des corrections liées à l'effet Compton, les teneurs en U-Th-K sont données par les relations ci-dessous. Le potassium et le thorium se déterminent à l'aide d'un seul pic (K : 1,460 MeV; Th : 0,930 MeV). Par contre, les trois raies utilisables pour l'uranium nous donnent la possibilité d'élaborer trois systèmes d'équations, permettant ainsi un contrôle permanent des résultats.
Η (610) - H'(610) = 24,72 Th + 79,22U (Ra) + 36,68 K) 930) - H' (930) = 18,74 Th + 15,22 Η ((Ra) 39,20 K U +) 1 (1 460) - H' (1 460) = 2,2160 Th + 10,24Н 145,30 K U (Ra) +) H (1 120) - H' (1 120) = 4,2906 Th + 17,988 U (Ra) + 45,491 K) 930) - H' (930) =18,744 Th + 15,117 H () 2 U (Ra) + 39,203 K H (1 460) - H' (1 460) = 2,2140 Th + 10,24 U (Ra) + 145,30 K) 295) - H' (295) =50,316 Th +187,53 Н (U (Ra) + 79,796 K) 930) - H' (930) =18,744 Th + 15,117 Н (U (Ra) + 39,203 K) 3 H (1 460) - H' (1 460) = 2,2140 Th + 10,24 (Ra) + 145,27 K U) H (610), H (930), H (1460) ... = intensité des raies 610 - 930 - 1460 keV H'(610), H'(930), H'(1460) ... = bruit de fond pour les mêmes raies

Les facteurs numériques correspondent au coefficient angulaire des droites d'étalonnage regroupés dans les tableaux suivants n°5 et n°6.

	0,	930	Ι,Ι	20	1,460					
	a	r	a	r	а	r				
U	15,117	0,9995	17,888	0,9999	10,240	0,9994				
Th	18,744	0,9997	4,2906	0,9996	2,2140	0,9995				
К	39,203	0,9971	45,491	0,9974	145,27	0,9990				

Tableau n°5

-61-

	0,	186	0,2	95	0,35	0	0,610			
	a	r	a	r	a	r	a	r		
U	199,82	0,9998	187,53	0,9998	205,37	0,9999	79,225	0,99999		
Th	82,979	0,9995	50,316	0,9996	42,582	0,9996	24,724	0,9995		
K	119,65	0,9908	79,796	0,9818	42,784	0,7794	36,682	0,9937		

a = coéfficient angulaire des droites d'étalonnage

r = coéfficient de correction

Tableau n°6

3.4. Calcul des teneurs

Il peut être entièrement effectué à l'aide d'une calculatrice programmable HP-97. Une première étape consiste à calculer à partir du spectre enregistré sur un listing d'imprimante les sept moyennes correspondant aux raies choisies (H 610, H 930, H 1120, H 1460 ...). Dans une deuxième étape, les moyennes calculées sont introduites dans un programme qui résoud les systèmes d'équations (1, 2, 3) et fournit immédiatement les teneurs en équivalent uranium - thorium - potassium et le taux d'équilibre entre l'équivalent uranium (radium) et l'uranium métal^{*}.

(*) Des phénomènes de lessivage peuvent en effet entraîner préférentiellement
 l'uranium ou ses descendants radioactifs et créer un certain déséquilibre dans
 la famille de l'uranium.

III - AUTORADIOGRAPHIE

Dans le but de localiser et de déterminer les sources de haute radioactivité porteuses de l'uranium dans les nodules phosphatés, une série d'analyses autoradiographiques a été tentée au moyen des détecteurs solides de traces nucléaires. Ceux-ci sont des films à base de nitrate de cellulosé, de dimension 9 x 12 cm, fournis par KODAK. Ils sont de deux types : les films CN-85 d'une épaisseur de 100 µm et les films LR-115 Type 2 fortement colorés en rouge et de même épaisseur que le premier. Ces films sont insensibles aux radiations électromagnétiques, d'où leur utilisation, sans risques, en lumière du jour et même dans des flux très intenses de rayonnements 🎸 ou X.

1. Technique analytique

Le film taillé à dimension est appliqué contre la surface polie de la roche à étudier. Un contact uniforme et strict entre la couche de nitrate de cellulose et la roche est nécessaire. Ainsi, le film enregistre les traces des particules a émises par les radioéléments contenus dans la roche. Le temps requis pour l'exposition dépend du niveau d'activité de l'échantillon et peut varier de plusieurs heures à plusieurs semaines. Dans le cas de nos échantillons, caractérisés par une radioactivité relativement faible, le temps d'exposition a été de 6 semaines.

2. Traitement des films

Les traces enregistrées par ces films n'étant pas directement visibles, leur révélation au moyen d'un traitement chimique, dans une solution alcaline, est indispensable.

Le réactif d'attaque recommandé est une solution dans l'eau distillée, de soude caustique pure pour analyse, à la concentration de 10 % (2.5 N).

La température d'attaque est de 60°C : celle-ci est obtenue en utilisant un bain marie, ou mieux une enceinte thermostatée (étuve par exemple).

En fin de traitement, il est nécessaire de laver à l'eau pendant une demi-heure au moins.

L'étude autoradiographique a été effectuée sur des lames minces (non couvertes) en vue de rendre possible à l'aide d'un microscope optique, la comparaison entre la pétrographie, la minéralogie et la localisation des radioéléments.

I - INTRODUCTION

La discrimination des principaux éléments radioactifs responsables de l'anomalie radiométrique régionale et stratiforme du V₃c, ainsi que la détermination de leurs concentrations respectives constituaient une étape déterminante préalable pour la suite des recherches. Ces études ont été réalisées par spectrométrie gamma en laboratoire, suivant la méthodologie décrite au chapitre précédent, paragraphe II. A cette fin, 200 grammes ont été prélevés à partir des échantillons très finement broyés (tamis de 65 meshs) puis analysés. Plus d'une centaine d'échantillons provenant des coupes étudiées dans le V3c et des divers affleurements répartis sur tout le bassin ont été ainsi analysés. En particulier, la coupe de Warnant qui représente le V₃c supérieur et celle d'Anhée qui montre le V₃c inférieur et les formations sous-jacentes ont été analysées en totalité en vue d'observer l'évolution de la distribution des radioéléments dans l'ensemble du Viséen supérieur. Celles de Poilvache et de Modave qui montrent la transition au Namurien ont également été étudiées en détail dans le même but.

II - RESULTATS D'ANALYSE ET INTERPRETATIONS

Ils sont regroupés dans les tableaux successifs ci-après et correspondent aux teneurs en uranium et en thorium exprimées en ppm et en potassium exprimées en % K₂O. Le rapport Ra/_U permettant l'étude de l'équilibre radioactif dans la famille radioactive de l'uranium a été également déterminé.

L'examen de ces résultats d'analyse par spectrométrie de permet de dégager plusieurs observations et de tirer quelques conclusions importantes qui orientent la suite des recherches :

 a) la série mixte schisto-calcareuse à nodules phosphatés ou V₃c, constituant les couches de passage du Viséen au Namurien est dans son ensemble enrichie en uranium. Les autres radioéléments, le Th et le K, se caractérisent dans cette série par des teneurs extrêmement faibles,



Faciès lithologique	N° des Echantillons	Radioactivité globale en (Ur)	U(ppm)	(ppm)	к (% к ₂ 0)	Um	Ra/U	Th/U	⁰ / ₄₂ 0
	WP-62	51,55	37,70	1,20	0,52	33,90	-10,1	0,0318	65,19
	WP-61	58,17	44,50	2,40	0,77	41,20	- 7,4	0,0539	53, 53
	WP-60	68,27	42,10	1,10	0,71	48,40	- 7,1	0,0595	68,16
	WP-59	72,02	63,70	1,40	0,41	58,40	- 8,3	0,0219	142,43
Schistes siliceux	WP-58	72,02	68,90	1,80	0,55	64,20	- 6,8	0,0261	116,72
Jen10000 B	WP-57	74,79	72,80	0,50	0,53	66,30	- 8,9	0,0068	125,09
	WP-55	88,87	86,00	0,93	0,35	79,40	- 7,7	0,0108	226,85
	WP-54	42,60	34,40	6,50	0,53	31,50	- 8,4	0,18	59,43
noirs ou	WP-53	32,13	14,50	5,10	0,98	14,40	- 0,7	0,35	14,69
	WP-52	30,47	19,80	5,50	1,14	19,00	- 4,0	0,27	16,66
brunâtres	WP-51	52,07	63,30	1,00	0,49	57,90	- 8,5	0,0157	118,16
	WP-50	45,98	45,40	4,60	0,83	42,00	- 7,5	0,10	50,60
Coupe de	WP-48	32,13	37,40	12,60	0,58	31,50	-16,8	0,33	54,31
	WP-47	21,60	12,20	3,10	0,59	11,60	- 4,9	0,25	19,66
WARNANT	WP-46	30,47	34,00	0,30	0,20	31,60	- 7,1	0,0088	158,00
	WP-45	18,00	7,20	5,90	1,35	7,30	1,4	0,82	5,40
	WP-42	21,50	21,15	6,10	1,11	20,20	- 6,0	0,28	18,19
	WP-38	13,60	8,60	0,00	0,35	8,90	- 3,5	0,00	25,42
	WP-35	30,01	34,10	3,80	0,94	32,60	- 4,4	0,11	34,68
	WP-43	19,39	15,80	2,00	0,36	15,20	- 3,8	0,13	43,28
	WP-41	22,16	10,90	0,00	0,05	10,60	- 2,8	0,00	218
Calcaires	WP-40	13,85	8,60	0,00	0,35	8,90	3,5	0,00	24,57
siliceux (V ₃ c)	WP-36	12,80	2,80	0,00	0,00	2,90	3,6	0,00	0,00
de WARNANT	WP-32	10,31	7,60	1,40	0,43	7,21	- 5,3	0,18	17,67
	WP-31	25,63	12,30	0,00	0,03	11,70	- 4,9	0,00	390
E.S.	Tahla					L	L <u></u>	*	-67

u/ _{K2} 0	a	39,55	30,61	78,69	39,14	60,13	53,80	92,64	42,45	35,22	359,14	327,50	106,66	93,39	132,98	75,63	66,72	62,95	71,16	44,68	25,33	90,20	58,20	53,03	71,77	40.80	58,05
Th/U	0,0203	0,0754	0,120	0,0331	0,1120	0,0494	0,0759	0,0265	0,0844	0,0580	0,00	0,00	0,017	0,0363	0,0032	0,0298	0,0769	0,0451	0,0427	0,0736	0,1500	0,1115	0,035	0,0558	0.557	0 0326	0,0598
Ra/U	1,7	1,5	5,3	-3,3	-2,7	-3,1	-1,8	-4,7	0,70	-3,9	-7,2	-3,5	0,70	2,1	-4,3	-3,7	-6,1	-5,2	-1,6	-0,3	-1,8	-2,5	0 ,80	-6,90	-5,90		-3,3
Um	86,20	26,90	15,80	52,50	35,40	43,10	37,10	46,80	45,30	29,80	116,70	139,10	83,80	53,40	59,80	51,70	40,10	52,50	48,30	35,20	21,60	42,20	39,30	48,30	60,80	30,10	40,40
K (ZK ₂ 0)	0,0	0,67	0,49	0,69	0,93	0,74	0,71	0,53	1,06	0,88	0,35	0,44	0,78	0,56	0,47	0,71	0,64	0,88	0,69	0,79	0,75	0,48	0,67	0,91	0,90	0.75	0,72
Th (ppm)	I.50	2,00	1,80	1,80	4,10	2,20	2,90	1,30	3,80	1,80	0,00	0,00	1,43	1,90	0,20	1,60	1,90	2,50	2,10	2,60	3,30	0,50	1,40	2,90	3,60	2,70	2,50
U (ppm)	73,70	26,50	15,00	54,30	36,40	44,50	38,20	49,10	45,00	31,00	125,70	144,10	83,20	52,30	62,50	53,70	42,70	55,40	49,10	35,30	22,00	43,30	39,00	51,90	64,60	30,60	41,80
Radioactivité globale	83,33	52,07	38,78	73,68	52,24	60,04	55,40	62,04	57,07	50,38	135,77	146,81	96,95	80,33	85,87	81,71	58,72	83,10	63, 18	53,73	30,47	48,75	55,40	63,71	91,41	52,63	55,40
N° des échantillons	Y-2	Ү -3	Y-4	Y5	Y-0	Y-7	Y-8	9-Y	Y-10	Y-11	Y-12	Y-12b	Y-13	Y-14	Y-15	Y-16	Y-17	Y-18	Y-19	Y-21	Y-22	Y-23	Y-24	Y-25	Y26	Y-27	Y-28
Faciès lithologique	(.	911g				Schistes siliceux					noirs et brunâtres		R - 14 - 19 - 19 - 19 - 19 - 19 - 19 - 19		du V ₃ c	-											

Coupe de référence	N° des échantillons	U (ppm)	Th (ppm)	K(ZK ₂ 0)	Um	Ra/U
LIA D NA NT	WPP-1	67,80	0,0	0,0	62,00	-8,6
WARNANI	WP P- 5	39,0	0,0	0,10	36,80	-5,6
DIOUI	BN-3	66,7	0,0	0,0	61,6	-7,6
BIOUL	BN-4	67,7	0,0	0,0	64	-5,5
	hw-an ₁	95,0	0,0	0,0	90,2	-5,1
	HW-AN ₂	186,0	3,5	0,0	208,0	11,8
HAIIT-I F-	HW-P	57,5	0,0	0,0	57,10	-0,7
WAST IA	HW-P ₂	61,2	0,0	0,0	68,9	12,6
POILVACHE	^{H₩−} ₽ ₅	132	0,0	0,0	139,0	5,3
	HW-P ₉	121	2,2	0,0	140,0	15,7
	YN-5	88,1	0,0	0,16	87,8	-6,5
	YN-28	41,8	2,5	0,72	40,4	-3,3

Tableau 9.- Résultats d'analyses par spectrométrie des nodules phosphatés.

Coupe de	N° des	Radioactivité					
référence	ECHANT.	globale	U(ppma)	Th (ppm)	K ₂ 0(%)	Um	Ra/U
	A-169	13,80	8,50	0,0	0,0	-	-
	A-167	27,13	15,8	31,0	1,72	-	-
	A-166	25,30	17,7	0,0	0,0	-	-
	A-165	11.06	6,10	9,60	1,77	5,6	-6,69
ANHEE	A-163	9,69	7,60	6,90	1,36	7,0	-7,80
(Fig 14)	A-152	8,23	4,5	0,0	0,0	-	-
(118.74)	A-151 bis	32,13	19,6	46,1	1,34	17,5	-10,60
	A-151	24.93	20,0	40,0	1,28	17,6	-11,8
	A-134	9,69	7,8	0,0	0,0	-	-
	A-126	5,54	3,4	9,3	0,98	3,3	-2,79
	A-125	4,80	2,6	0,0	0,0	-	-
	mo-25	30,47	26,50	15,30	2,29	26,0	-1,79
	Mo-24	30,47	28,20	14,40	2,30	28,50	1,10
	Mo-22	24,93	21,70	4,0	1,23	20,2	-6,8
MODAVE	Mo-21 RT	30,47	14,80	4,10	1,34	13,2	-10,60
(Fig.9)	Mo-20	66,48	130,0	0,0	1,27	124,0	- 4 ,50
	Mo-19 RT	160,06	159,0	4,0	0,0	146.0	-8,10
Schistes	Mo-18 ES	149,58	152,0	1,3	0,0	143.0	-5,80
du	Mo-17 RT	152,30	174,0	13,0	0,0	161.0	-7,40
	Mo-17 ES	152,30	156,0	0,0	0,0	146,0	-6,30
V _{3C}	Mo-16 RT	150,34	169,0	0,0	0,0	156,0	-7,59
	Mo-15	110,80	118,0	0,0	0,0	113,0	-4,09
	Mo-14	30,47	15,0	2,80	0,33	14,50	-3,20
	Mo-13	30,47	22,30	2,10	0,37	22,50	0,89
BIOUL	В−€4	nd	49,0	3,30	0,63	47,2	-4
(Fig.12)	в-с7	nd	35,9	1,12	0,36	33,6	-7
HAUT-LE-	HW-1	123,57	121,7	2,37	0,54	-	
WASTIA	₩ - 2	146,56	144,4	2,20	0,47	-	-
(Fig.13)	<u>ым-3</u>	128,41	127,0	2,16	0,29	-	-
	₹II-b	22,16	10,50	6.84	1.44	10.80	₹,30
	YII-a	26,31	13,30	8,80	2,17	14,0	5,40
			l j				

Tableau 10. Résultats d'analyse par spectrométrie gamma



souvent inférieures aux valeurs de clarke pour les sédiments considérés. Le Th et le K sont, en particulier, pratiquement absents dans les nodules phosphatés. Ces observations permettent de conclure que les anomalies radiométriques à caractère régional et stratiforme repérées au scintillateur sur le terrain correspondent bien à des concentrations anormales en uranium.

- b) La distribution de l'uranium, à l'image de celle de la radioactivité est très hétérogène, même au droit d'horizons apparemment homogènes sur le plan lithologique. Les écarts des teneurs sont très grands, avec des changements brutaux d'un échantillon à l'autre (Tabl. 7 à 10).
- c) Si la présence de l'uranium dans les faciès schisteux et phosphatés ne représente pas un fait nouveau, sa forte concentration dans les calcaires aussi bien cristallisés que ceux formant la base du V₃c et ceux du V₃b Ø ou "Bleu Belge" apparaît, par contre, comme un événement assez inhabituel.

Cette dernière observation ainsi que l'hétérogénéité de sa distribution démontrent le caractère complexe du comportement géochimique de l'uranium à la fin de la sédimentation dinantienne.

d) Un autre fait à signaler découle de l'existence de quelques niveaux argileux, particulièrement riches en thorium et interstratifiés dans les calcaires uranifères (Fig. 14 et Tabl. 10). Ces horizons argileux et leur contenu en radioéléments apportent des informations intéressantes d'ordre paléogéographique, sédimentologique et géochimique, utiles pour la compréhension de la distribution de l'uranium dans le bassin.

Dans la suite de ce travail, nous nous attacherons à rechercher les modalités de la répartition de l'uranium, à la lumière de toutes les données géologiques, paléogéographiques et géochimiques. La distribution des autres radioéléments, le Th et K sera également discutés.

III - ETUDE DE L'EQUILIBRE RADIOACTIF

Les principaux radioéléments naturels (U₂₃₈, U₂₃₅, Th₂₃₂) forment trois familles radioactives constituées de radioisot**opes** qui descendent les uns des autres jusqu'à l'obtention d'un élément stable final : le plomb. La figure 21 représente la famille radioactive de 1'U₂₃₈, le nombre atomique des divers descendants étant donné en fonction de son nombre de masse. Chacun des descendants de la famille est caractérisé par sa période ou demi-vie.



Fig. 21.- La famille de l'uranium 238 Z = nombre atomique N = nombre de masse

Il existe dans chaque famille un état d'équilibre atteint lorsque le nombre de désintégrations par unité de temps est le même pour tous les descendants successifs.

Dans le cas du Th 232, l'équilibre est réalisé en 70 ans. Dans le cas de l' U_{238} , l'équilibre n'est atteint qu'au bout d'un million d'années du fait de la présence de deux descendants à longue période : U_{234} (2.52 10⁵ ans) et Th₂₃₀ (9.10⁴ ans).

Si l'équilibre est toujours atteint dans la famille du thorium (ce qui permet de doser l'élément de tête en utilisant l'un quelconque de ses descendants), il n'en est pas de même dans la famille de l'uranium. En effet, les descendants de l'uranium appartenant à des cases très variées du tableau périodiques des éléments, ont des comportements chimiques très différents (le radon est un gaz rare, le radium un alcalino-terreux) BALEINE <u>et al.</u>, 1976].

Dans la nature, un comportement géochimique différentiel de l'un ou l'autre des descendants successifs sous l'effet des phénomènes de lessivage ou de précipitation lié à la circulation des eaux est donc courant. Il en résulte une rupture d'équilibre (COPPENS <u>et al.</u>, 1965). Un tel déséquilibre est quantifiable sur les spectres des raies correspondant aux énergies de désintégration caractéristiques de l'élément de tête et des descendants successifs.

Dans le cas de nos échantillons, le contrôle de l'équilibre radioactif entre l'uranium et ses dérivés a été systématiquement effectué en utilisant la raie à 184 keV liée à l'uranium métal et la raie à 352 keV liée au Pb 214 descendant du radium. Dans un échantillon en équilibre, le rapport des intensités de ces raies corrigées des effets secondaires (influence du bruit de fond, du Th et du K⁴⁰) vaut sensiblement 1.

Les valeurs du rapport Ra/ $_U$ (voir Tabl. 7 à 10) représentent l'écart en $% = 10^{-1}$ entre les teneurs en uranium métal et en radium ou équivalent uranium.

L'examen de ces valeurs montre que l'uranium est en équilibre radioactif avec ses descendants dans l'ensemble de nos échantillons. Les valeurs négatives (généralement inférieures à 10 %) qu'on observe, semblent cependant traduire un certain lessivage de l'uranium; en fait, elles sont surtout imputables à la méthode d'analyse utilisée et aux conditions d'expérimentation.

IV - RELATION ENTRE LES TENEURS EN URANIUM ET LA RADIOACTIVITE GLOBALE MESUREE IN SITU

Dans toutes les coupes étudiées dans le V_3^c , la distribution de l'uranium et celle de la radioactivité varient dans le même sens.

Le **re**port graphique des teneurs en uranium (ppm) en fonction de la radioactivité globale (en Ur) mesurée in situ (fig.22) confirme cette observation et montre l'existence d'une ponne corrélation entre ces deux paramètres.

-73-



Le coefficient de corrélation r, entre les couples de valeurs est égal à 0.94 donc significatif. Cette corrélation positive indique que les mesures de radioactivité globale effectuées sur le terrain sont bien représentatives de la teneur en uranium. Il est donc possible, à partir de la droite de corrélation obtenue, de déterminer avec une bonne approximation la teneur en uranium dans les coupes qui n'ont pu faire l'objet d'une analyse en spectrométrie de laboratoire et ce, connaissant les taux de radioactivité globale qui ont été mesurés.

En outre, la droite de corrélation Uppm - radioactivité globale (Ur) permet deux autres observations :

- on remarque que la droite de corrélation ne passe pas par l'origine,elle admet une abscisse à l'origine positive après correction de l'influence du bruit de fond. Cette abscisse positive, correspond à la contribution du Th et du K à la radioactivité globale. Celle-ci est assez faible (~ 15 Ur) : ce qui est compatible avec l'extrême pauvreté du V₃c en ces deux radioéléments.
- Les points représentatifs des pics uranifères les plus importants des principales coupes s'individualisent nettement. Leur bon regroupement autour de la droite de corrélation rend compte de l'absence fréquente du Th et du K dans les horizons les plus enrichis en uranium.
- L'existence de cette bonne corrélation entre les teneurs en uranium et la radioactivité globale mesurée in situ constitue aussi une autre preuve de l'absence de déséquilibre radioactif dans la série étudiée.

CHAPITRE	III	:	Ī) ()]	<u>N</u> 1		E	E	S]	P]	E	T	R	0	G	R	A	P	H	[]	(<u>)</u>	J	E	s,	_								
																									_											
			M	1	N	E	R	A	L	0	G	I	Q	U	E	S	}		E	T		G	E	; (2	C	H	I	M	I	<u>Q</u>	U	E	S	5	
			D	E		L	A		S	E	R	I	E		D	E		I	2	<u>A</u>	S	S	A	G	E		Ľ) [J	<u>v</u>		Ε	S	E	Ε	N
												A	ប		N	A	M	ιτ	J	R	I	Ε	N													

Etant donné le caractère particulier de l'accumulation de l'uranium dans le V₃c et dans les calcaires sous-jacents et l'hétérogénéité de sa distribution dans tous les lithofaciès, une étude pétrographique, minéralogique et chimique détaillée de ces dépôts s'impose. Le but poursuivi est de rechercher les corrélations éventuelles entre ces données et les teneurs en uranium précédemment déterminées.

I - ETUDE DES SCHISTES V3C

1. Données pétrographiques, minéralogiques et paléontologiques

1.1. Pétrographie

Ce sont de véritables roches de transition détritiques-chimiques, appartenant à la classe des lutites où la distinction entre ce qui est ciment et ce qui ne l'est pas est très difficile à faire.

Lorsqu'elles sont chargées en matières organiques, elles sont de teinte noire ou brunâtre. Vues au microscope, les lamines de ces schistes carbonés et phosphatés sont parallèles ou plus ou moins ondulées. Le quartz d'origine détritique est pratiquement absent. Il n'y a aucune marque de bioturbation.

1.2. Minéralogie

En raison de la finesse de leur grain, de leur compacité et de la présence des matières organiques, la minéralogie des schistes du V_3^c a surtout été débrouillée par diffraction des rayons X. Les analyses ont été effectuées à partir de la fraction inférieure à 2 μ m, suivant la technique des pâtes orientées (voir annexe 2). Les minéraux non argileux ont été aussi déterminés à partir de l'analyse du mélange naturel.



-78-

Les résultats obtenus indiquent que qualitativement, la composition minéralogique argileuse et non argileuse est la même pour tous les échantillons analysés. Mais quantitativement, quelques différences apparaissent entre le bassin d'Anhée et les petits bassins orientaux, en particulier celui de Modave. Il s'agit surtout des changements quantitatifs des proportions des différentes phases argileuses en présente. Au sein d'une même coupe, les variations sont très peu significatives.

a) Composition minéralogique argileuse

La série V_3^{c} est caractérisé par une teneur très forte en illite (90 % en moyenne de la fraction argileuse, dans le bassin d'Anhée, 80 % dans le bassin de Modave), avec un indice de cristallinité très élevé. Les autres minéraux argileux sont : la chlorite, la kaolinite et les interstratifiés (10-14 s) en proportion très faible.

b) Les minéraux non argileux

La diffractométrie des rayons X montre que d'autres minéraux sont associés aux argiles dans les schistes du V_3^{c} . Par ordre d'importance, on peut citer (fig. 23) :

- le quartz, particulièrement abondant et qui apparait comme l'un des constituants essentiels de ces dépôts. Il est cryptocristallin;
- le phosphate fluorapatite, de formule $Ca_{10}(PO_4)_6 F_2$, présent surtout dans les termes du V₃c supérieur;
- les feldspaths alcalins dont la nature n'a pu être déterminée de façon certaine;
- la calcite est présente dans les niveaux de base qui alternent avec les derniers bancs calcaires viséens. Ces niveaux sont parfois de véritables calcachistes.

1.3. Conclusions

L'étude pétrographique et minéralogique des schistes V₃c montre que ceux-ci sont constitués de particules argileuses (surtout illite) et de silice cryptocristalline (le quartz d'origine clastique étant pratiquement absent) : d'où le nom de <u>silicites</u> qui leur est attribué (SCHERRE et

VAN TASSEL, 1969). La silice est probablement d'origine chimique et même biochimique. La présence des minéraux phosphatés (fluorapatite) confirme la coexistence des deux types de sédimentation : détritique et chimique avec une prépondérance de cette dernière. Ni les études en lames minces, ni l'application de la diffraction des rayons X n'ont montré de différences essentielles de nature entre les composants des schistes uranifères et ceux des schistes peu (ou non) uranifères.

1.4. Données paléontologiques

Les principaux groupes caractéristiques sont les goniatites et les brachiopodes. Dans la coupe de Haut-le-Wastia, nous avons recueilli de nombreux débris de goniates difficilement déterminables et des brachiopodes surtout des *Chonetes*. A Warnant, les schistes V₃c situés au-dessus du dernier banc calcaire viséen n'ont pas fourni de fossiles. Il en est de même des autres coupes étudiées dans cette série.

2. Distribution des matières réductrices, des phosphates et des carbonates

Compte tenu du rôle bien connu que jouent les matières réductrices (principalement la matière organique) et les phosphates dans le piégeage de l'uranium en milieu sédimentaire (LANDAIS et CONNAN, 1980; DEGENS et al ; 1977, SLANSKY, 1980 ...), ces éléments ont été dosés en vue de rechercher leurs relations éventuelles avec les teneurs en uranium. Les méthodes analytiques utilisées sont décrites en annexe II. En outre, la teneur en carbonates des échantillons a été également déterminée. Les tableaux n° 12 et 15 rassemblent les résultats d'analyse obtenus.

2.1. Les matières réductrices

Elles présentent des variations significatives dans l'ensemble de la série V_3^{c} . Dans la carrière de Jaiffe à Warnant, les teneurs les plus élevées semblent correspondre aux horizons schisteux de teinte noire. Cette observation n'a cependant pas été vérifiée partout. Dans la coupe de Poilvache, les teneurs les plus élevées ont plutôt été relevées dans les faciès schisteux de teinte brune. Dans tous les cas, les variations des teneurs sont généralement très brutales d'un échantillon à l'autre; elles rendent compte du caractère hétérogène de la distribution des matières réductrices.

2.2. Les phosphates

De l'examen des résultats d'analyse, il apparait que les schistes comme l'ensemble des roches constituant le V₃c sont exceptionnellement enrichies en P_2O_5 , comparés au clarke de ce type de roches (Tabl. 11).

Nature des roches	P2 ⁰ 5 %							
Grès	0,08 à 0,16							
Schistes	0,11 à 0,17							
Roches carbonatées	0,03 à 0,07							
Dépôts des grands fonds :								
- carbonatés	0,08 à 0,18							
- argileux	0,14 à 0,33							
- siliceux	0,13 à 0,27							

Tabl. 11.- Teneurs moyennes en P₂0₅ % des roches sédimentaires d'après Mc KELVEY (1973)

Les teneurs sont en effet très élevées, variant de 0,19 % à 7,12 % $P_2^{0}{}_{5}$, avec une moyenne de 3,55 % $P_2^{0}{}_{5}$ pour une cinquantaine d'échantillons analysés. De l'examen bibliographique, il ressort qu'en Europe, seuls les schistes de la Montagne Noire et des Pyrénées (France), d'âge carbonifère et renfermant des nodules phosphatés également, présentent des teneurs aussi élevées en $P_2^{0}{}_{5}$ (RAGUIN 1961)

2.3. Les carbonates

Dans leur ensemble, les schistes de la série V_3c sont pauvres en carbonates, sauf à la base où certains horizons à l'état de calcschistes atteignent 18 % de CO₃ (niveau WP-40, fig. 6). Au-dessus des derniers bancs calcaires, les teneurs en carbonates sont extrêmement faibles, généralement inférieures à 1 %. Elles sont pratiquement nulles dans le Namurien et dans les faciès V₃c immédiatement sous-jacents; elles marquent la fin irréversible de la sédimentation carbonatée. Toutefois, la sédimentation chimique semble se prolonger avec la précipitation de la silice et des phosphates.

Référence	N° des échantillons	P ₂ 0 ₅ %	Matières réductrices	co3
WARNANT (fig.10) Schistes du ^V 3c	WP-62 WP-61 WP-60 WP-59 WP-58 WP-57 WP-55 WP-54 WP-53 WP-52 WP-51 WP-50 WP-48 WP-47 WP-46 WP-45 WP-45 WP-42 WP-38 WP-35	2.13 2.88 5.95 4.66 3.01 2.99 5.04 3.13 0.47 2.52 3.01 2.47 2.26 0.91 2.87 0.33 2.64 2.18 2.22	$ \begin{array}{c} 1.87\\ 1.61\\ 1.67\\ 1.32\\ 1.63\\ 1.44\\ 1.41\\ 1.09\\ 1.39\\ 1.07\\ 1.12\\ 1.11\\ 1.45\\ 1.11\\ 1.90\\ 0.89\\ 0.52\\ 1.09\\ 1.14 \end{array} $	$\begin{array}{c} 0.60\\ 0.40\\ 0.50\\ 0.40\\ 0.90\\ 0.70\\ 0.50\\ 0.40\\ 0.40\\ 0.40\\ 0.40\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.00\\ 0.50\\ 7.60\\ 18.60\\ 1.60\\ 8.90 \end{array}$
POILVACHE (fig. 11) Schistes du V ₃ c	$\begin{array}{c} Y-2 \\ Y-3 \\ Y-4 \\ Y-5 \\ Y-6 \\ Y-7 \\ Y-8 \\ Y-9 \\ Y-10 \\ Y-11 \\ Y-12 \\ Y-12b \\ Y-13 \\ Y-14 \\ Y-15 \\ Y-16 \\ Y-17 \\ Y-18 \\ Y-19 \\ Y-21 \\ Y-22 \\ Y-23 \\ Y-24 \\ Y-25 \\ Y-26 \\ Y-27 \\ Y-28 \end{array}$	$\begin{array}{c} 3.38\\ 0.88\\ 0.52\\ 7.12\\ 2.75\\ 6.50\\ 3.38\\ 4.51\\ 2.15\\ 0.42\\ 6.68\\ 6.84\\ 6.20\\ 5.85\\ 4.58\\ 5.17\\ 6.92\\ 2.76\\ 4.83\\ 4.79\\ 1.18\\ 3.02\\ 1.97\\ 2.91\\ 5.98\\ 4.83\\ 3.11\end{array}$	$ \begin{array}{c} 1.42\\ 1.39\\ 1.35\\ 1.47\\ 2.65\\ 1.88\\ 1.78\\ 1.71\\ 2.27\\ 1.40\\ 1.79\\ 1.49\\ 2.68\\ 2.33\\ 1.09\\ 1.01\\ 1.10\\ 2.00\\ 0.87\\ 0.59\\ 1.29\\ 2.15\\ 1.29\\ 0.51\\ 0.47\\ 0.82\\ 0.85\end{array} $	$\begin{array}{c} 0.00\\ 0.84\\ 0.44\\ 0.84\\ 0.38\\ 0.00\\ 0.43\\ 0.00\\ 0.86\\ 0.00\\ 0.86\\ 0.00\\ 0.85\\ 0.42\\ 0.41\\ 0.00\\ 0.85\\ 0.42\\ 0.41\\ 0.00\\ 0.42\\ 0.43\\ 0.42\\ 0.43\\ 0.42\\ 0.84\\ 0.36\\ 0.42\\ 0.85\\ 0.43\\ 0.65\\ 0.34\\ \end{array}$

Tableau 12.- Résultats d'analyses chimiques



-82-

II - ETUDE DES CALCAIRES $V_3 b - V_3 c$

L'intérêt d'une étude biostratigraphique, pétrographique et minéralogique de ces calcaires est double :

- tenter de reconstituer l'ensemble de la série uranifère V₃c;
- établir des corrélations stratigraphiques entre le bassin d'Anhée et les petits bassins à coeur de Namurien situés à l'Est du synclinorium.

La spectrométrie **%** ayant montré que certains calcaires du V₃b**%** étaient aussi uranifères que ceux du V₃c, l'étude a été élargie à cet ensemble dans le but de suivre l'évolution de la distribution de l'uranium depuis la base du Viséen terminal.

1. Données pétrographiques, minéralogiques et paléontologiques

Nous avons vu que le V_3^c ne comporte des termes calcaires que dans le bassin d'Anhée. A l'Est, il est essentiellement à l'état des schistes d'âge V_3^c supérieur (lacune du V_3^c inférieur). Le V_3^c , quelque soit sa lithologie, repose en concordance de stratification sur des calcaires purs, gris foncés, bioclastiques à briachiopodes et datés V_3^b par leur abondante microfaune de foraminifères. Sous le V_3^b , les faciès calcaires sont très variés et sont également caractérisés par leurs assemblages de foraminifères (Tabl.14).

Les calcaires V_3 c, là où ils existent, présentent des faciès assez variés pouvant être répartis en deux groupes :

- à la base (V₃c inférieur), on rencontre des calcaires gris clair, bioclastiques, parfois crinoïdiques et assez riches en microfaune de foraminifères;
- au sommet (V₃c supérieur) on trouve des calcaires fins, très siliceux, de teinte grise, plus ou moins pigmentés en matières organiques. Celles-ci sont distribuées en petits lits parallèles à la microstratification (banc WP-41, Fig.10) ou en petites tâches noires disséminés dans la masse du sédiment (banc WP-40, Fig. 10). L'examen microscopique montre en outre de rares petites plages brunes de phosphate amorphe (collophanite) Si les foraminifères y sont totalement absents, les conodontes, par contre sont très abondants.

HAUT-LE WASTIA	нм-с ¹ нм-с ³	X			×												
	<u> </u>	х		×	×												
00L	9 2- 58	×		×		×				×							
BIC	८८ - ८४	×					_		×								
	991-∀	×					-					X	x				
	89 I - A	×		×	×			×	×				×	×	×	×	
EE	69 ≀-▼		×	×	×		×		×				×	×	×	×	
ANH	02 1- A				×								×				 -
	ME-31				×							×					
	76-JM	×		×				×	×				×	×			
IN	9E-39	×			×	×	×		×	×	×		×				
ARNA	l†-an						×										
3	64-43			×											:		
Coupes de références et n° des échantillons	CONODONTES	Gnathodus girti girti	" girti (?) rhodesi	" homopunctatus	Paragnathodus commutatus	" топоподозия	" nodosus	" multinodosus	Neoprioniodus singularis	ilibbardella acuala	Prioniodina subaequalis	Spathognathodus abnorbis	Hindeodella sp	Ligonodina sp	Hibbardella sp	Ozarkodína sp	
Age et localisation								V ₃ c			BASSIN	*****	DE		DINANT		

Alle A

Tabl. 13.-

-84-



Archaediscidae primitifs.

- V1b Apparition des Archaediscidae primitifs (Planoarchaediscus, Paraarchaediscus) issus des Brunsia par formation progressive d'une couche radiée dans les régions ombilicales.
 - Apparition des Permodiscus.
 - Apparition des Archaediscus à lumières lisses.
- V2a Persistance des Archaediscidae primitifs.

Archaediscus à lumières généralement lisses.

- V2b | Disparition presque totale des Archaediscidae primitifs et multiplication des V3a (Archaediscus à lumières lisses.
 - Multiplication des Archaediscidae à enroulement sigmoïde et apparition de quelques Arch. à nodosités arrondics (A. cornua, A. demaneti).
- V3ba Apparition des Archaediscus géants (A. mölleri, A. gigas) et Archaediscus à nodosités arrondics parmi les petites formes banales héritées du V2b-V3a. (Ce stade est contemporain de celui de l'apparition des Houcchinia).

Archaediscidae à nodosités.

- V3b³ Apparition progressive des Rugosourchaediscus; la denticulation des formes de transition commence vers le centre de l'enroulement; elle est souvent peu perceptible et a le plus souvent échappé à l'obseravtion. Ces Rugosourchaediscidae voisinent avec les Archaediscus à nodosités arrondies. Très rares Neoarchaediscus. Ce stade d'évolution a été particulièrement bien observé en Iran (F. BOZORGNIA).
- V3br Les nodosités apparaissent dans tous les groupes.

Multiplication des *Rugosourchaediscus*. *Neourchaediscus* plus fréquents vers le haut.

Persistance des formes de type V2b-V3a.

Les aspérités annonçant les Asteroarchaediscidae apparaissent également dans la partie terminale de cette zone.

Archaediscus étoilés par des aspérités.

- V3c Apparition des Asteroarchaediscus typiques. multiplication des Neoarchaediscus. Nombreux Rugosoarchaediscus.
- Nm Multiplication des Asteroarchaediscus. Apparition des Eosigmoilina (Pas en Belgique).

Tab. 14.- Zonation micropaléontologique du Viséen (Extrait de PIRLET, 1972).



Fig. 24- Corrélations entre le bassin d'Anhée et les pétits bassins orientaux.

-86-



2. <u>Reconstitution de la série V₂c dans le synclinal d'Anhée</u>

La recherche des conodontes dans les calcaires de la coupe de Warnant (fig. 10) et dans ceux du sommet de la coupe d'Anhée, a permis de recueillir une microfaune abondante et diversifiée de conodontes.

Les seuls genres les plus caractéristiques sont les genres Gnathodus avec entre autres, des formes comme Gnathodus bilineatus bilineatus, Gnathodus girti girti, Gnathodus homopunctatus, Gnathodus rhodesi et le genre Paragnathodus avec les espèces comme Paragn. commutatus, Paragn. mononodus, Paragn. nodosus (P1.6).

Le recoupement de ces différentes formes (Tabl. 13) et l'abondance des individus recueillis nous permettent de corréler les niveaux WP-31 à WP-36 de la coupe de Warnant avec les bancs A.168-A.169 de la coupe d'Anhée et partant, de reconstituer l'ensemble du V₃c (fig.24) dans le bassin d'Anhée.

Une corrélation biostratigraphique identique a été faite entre les mêmes bancs calcaires de la coupe de Warnant et les trois derniers de la coupe de Bioul (fig. 25). Dans toutes les coupes, la limite entre le V₂c et le Namurien est basée sur les caractères lithologiques.

3. <u>Corrélations litho-biostratigraphiques entre le bassin d'Anhée et les</u> petits bassins orientaux

Depuis 1963, R. CONIL et H. PIRLET ont divisé le Viséen de l'Ardenne en une série des zones micropaléontologiques sur la base des successions d'assemblages des foraminifères ainsi que sur le développement phylogénique des Archaediscidae (Tabl. 14).

Un échantillonnage assez serré de la coupe d'Anhée et des calcaires des coupes de Modave et de Ocquier a permis la confection d'un grand nombre de lames minces. Grâce à leur microfaune de foraminifères, une datation précise de ces séries calcaires a été faite. Cette datation démontre qu'à l'Est comme d**g**ns le Bassin d'Anhée le V₃c quelle que soit sa lithologie repose sur des calcaires d'âge V₃b**f** : ce qui permet une bonne corrélation entre les deux domaines.

4. Données chimiques

Les matières réductrices, les phosphates et les carbonates ont été également analysés dans les calcaires uranifères de la coupe de Warnant. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau n° 15. Les méthodes d'analyse utilisées ont été les mêmes que pour les schistes. De l'examen des résultats, il apparait que les faciès carbonatés sont peu chargés en matières réductrices; cependant, leurs teneurs en P₂O₅ semblent assez élevées, comparées aux valeurs de clarke pour les carbonates.

Faciès	N° des échantillons	P ₂ ⁰ 5 (%)	Matières réductrices Mill.équiv.K ₂ C ₂ C ₇	со ₃
CALCAIRES V ₃ c	WP-43 WP-41 WP-40 WP-36 WP-32 WP-31	1.07 1.77 1.89 2.18 0.31 0.66	0.36 0.35 0.60 0.10 0.27 0.39	65.20 78.20 40.10 98.60 39.00 81.60
SCHISTES NAMURIENS	^Y II ^{-b} Y _{II} -a	0.19 0.27	0.75	0.0 0.41

Tabl. 15.- Autres résultats d'analyses chimiques

On remarque aussi que si certains bancs sont franchement calcaires, avec des teneurs supérieures à 95 % en CO_3^{--} (hanc WP-36), d'autres au contraire, le sont beaucoup moins (banc WP-40) et rendent compte du caractère extrêmement siliceux de l'ensemble du V₃c supérieur.

Dans la suite de ce travail, les données relatives aux calcaires seront discutées en même temps que ceux des faciès schisteux avec lesquels ils sont associés dans la série étudiée. Cependant, la distinction entre les deux faciès sera toujours faite chaque fois qu'il en sera nécessaire.

III - LES PHOSPHORITES *

Etant donné d'une part le caractère peu commun des occurences phosphatées dans les schistes uranifères du V_3 c et d'autre part, le rôle que ces occurences phosphatées semblent avoir joué dans le piégeage de l'uranium, une étude détaillée de celles-ci s'impose.

* Par "Phosphorite" est entendue une roche phosphatée, contenant 12-40 % P₂0 et composée de phosphate de calcium (RIKHIN, 1961 in J. SCHEERE <u>et al</u>, 1969).

Les phosphorites du V₃c se présentent sous trois <u>faciès</u> différents : de straticules, des phosphates en grains et surtout des nodules phosphatés.

1. Les straticules

Elles sont de couleur brune, jaune ou grise, de 1 à 10 mm d'épaisseur, continues ou discontinues et disposées parallèlement aux lits schisteux. C'est principalement dans la coupe classique de la carrière de Jaiffe à Warnant qu'ils sont le mieux observables, dans les niveaux schisteux situés sous le dernier banc calcaire viséen.

2. Les phosphates en grains

Ce faciès montre des grains phosphatés de taille inférieure à 2 mm, brunâtres et amorphes entre nicols croisés. Il n'a été rencontré que dans deux niveaux seulement : l'un à Warnant (WP-57) où les grains phosphatés sont cimentés par une gangue également phosphatée et amorphe - l'autre niveau de phosphate en grains appartient à la coupe de Haut-Le Wastia (WP-15), les grains y sont enrobés dans les lamines plus ou moins ondulées des schistes encaissants pl. IV ph. 2 . Les conodontes et les bryozoaires (?) ont été rencontrés dans ce faciès pl. VI ph. 6

3. Les nodules phosphatés

Ce sont des galets sphériques ou elliptiques plus ou moins aplatis, de l à 6 cm de diamètre, de même teinte noire, grise, ou brune que les schistes dans lesquels ils sont encaissés. Les nodules phosphatés sont présents dans toutes les coupes étudiées, essentiellement localisées dans les couches de passage du Viséen au Namurien. En effet, on ne les trouve ni dans les calcaires V_{3b} sous-jacents, ni dans l'importante série détritique qui surmonte le V_{3C} supérieur.

L'existence de ces nodules phosphatés de l'Ouest à l'Est du bassin rend compte de la grande extension de la sédimentation phosphatée au cours de cette période de transition. Un fait est cependant à remarquer : alors que dans le synclinal d'Anhée les nodules sont distribués en <u>plusieurs</u> niveaux dans toutes les coupes décrites, à l'Est, dans les petits bassins de Modave et d'Ocquier, les nodules sont réduits en un niveau unique.

Parallèlement à la réduction Ouest-Est de la puissance de l'anomalie uranifère, on assiste donc à une réduction dans le même sens des occurences phosphatées. Il est dès lors apparu intéressant d'étudier les nodules phosphatés, également du point de vue de leur contenu en uranium.

3.1. Pétrographie des nodules phosphatés

Ils présentent un air de famille pétrographique. Leur cassure terreuse laisse apparaître une endogangue phosphatée noire, brune, grise ou blanche. Sciés, certains de ces nodules montrent une structure interne concentrique avec ou sans nucleus soulignée par les variations de concentration de la matière organique (Pl.III ph. 9).D'autres nodules ne témoignent d'aucune différenciation (Pl.III ph. 8). Tous les nodules sont caractérisés par la présence de nombreux radiolaires à tests généralement bien conservés et appartenant pour la plupart au groupe des Spumellaria. Certains sont tellement bien conservés qu'on arrive à observer les détails de la structure de leur squelette. Les uns ont des tests pourvus d'épines plus ou moins longues, les autres des tests à sphères.concentriques grillagées (pl. V ph. 1). Trois substances participent à leur conservation : le phosphate de chaux, la silice et la matière organique. Cette dernière, plus ou moins abondante est distribuée de la façon la plus capricieuse, en tâches opaques vaguement délimitées. Les nodules contiennent parfois des goniatites, des conodontes, des foraminifères et des restes végétaux. Nous avons en particulier trouvé dans un nodule de la coupe de Bioul (Niveau BN-4) des organismes végétaux à microstructure idéalement conservée. Ils ont été identifiés et rapportés au bois secondaire d'Archaeocalamites (embranchement des Sphenophytes) d'âge Dévonien-Carbonifère inférieur, par le laboratoire de Paléobotanique de l'Université de Paris VI^{*}. Ce bois est complétement épigénisé en apatite microcristalline (pl. VI ph. 1 à 4).

La parfaite conservation de ces débris végétaux et des radiolaires à tests d'une extrême délicatesse exclut toute idée de remaniement de nature mécanique. Elle constitue une preuve que la sédimentation s'est opérée en milieu très calme.

3.2. Etude minéralogique des nodules phosphatés

L'étude microscopique et l'analyse par diffraction des rayons X montrent que l'apatite s.l. et la silice sont les constituants minéralogiques essentiels des nodules : ce caractère fait de ceux-ci des <u>phosphates</u> siliceux (voir fig. 26).

★ Je remercie vivement Madame A. LEJAL-NICOL du Laboratoire de Paléobotanique de l'Université de Paris VI pour son amabilité et pour l'aide qu'elle m'a apportée pour l'identification et la datation des débris des plantes fossiles.

-91-



- . La silice est surtout à l'état de quartz microscristallin d'origine secondaire, disséminé ou concentré en petits agrégats dans la gangue phosphatée; elle peut aussi se présenter sous forme de calcédonite. Un fait à souligner est, comme dansles schistes encaissants, l'absence de grains de quartz d'origine détritique.
- . L'apatite se présente sous trois faciès différents :
 - un faciès brun, cryptocristallin, intimement associé à la matière organique et constituant la gangue phosphatée : il s'agit de la collophanite (pl. III ph. 10)
 - un faciès brun foncé, distribué en plages plus ou moins étendues, amorphe, à fort relief et complétement isotrope entre nicols croisés : il peut encore être assimilé à la collophanite (pl.III ph. 10). Ce faciès semble se développer au détriment du premier.
 - un faciès à petits cristaux prismatiques formant des filonnets méandriformes dans la gangue phosphatée constituant le fond de la roche. Il a été déterminé comme étant de la fluoropatite par diffraction des rayons X
 (pl. IV ph. 3 et 4).

J. SCHEERE et R. VAN TASSEL (1969) ayant fait mention de la présence de la carbonate-fluorapatite (ou francolite) dans ces nodules et dans ceux du canal de Blaton, nous avons poussé plus loin la détermination minéralogique du phosphate par la mesure indirecte du CO_2 de la carbonate-fluorapatite. Cette teneur a été calculée par application de la méthode des "couplesdes pics" mise au point par GULDBRANDSEN, (1970). Mc CLELLAN et LEHR (1969) ont montré qu'il y a une corrélation étroite entre les paramètres cristallographiques et la teneur en CO_2 du minéral apatite. Ces auteurs ont en outre montré que les variations des paramètres du réseau dues à la substitution de PO_4^{3-} par CO_3^{2-} affectent davantage le paramètre a que le paramètre b. En se fondant sur ces données, GULDBRANDSEN (1970) a proposé une méthode simple qui permet de calculer la teneur pondérale en CO_2 Z à partir des diffractogrammes de la carbonate-fluorapatite.

La méthode consiste à mesurer sur les diffractogrammes de diffraction des rayons X l'écart angulaire 20 entre deux pics du minéral apatite. L'un de ces pics doit être du type (001) donc directement lié au paramètre c, l'autre lié au paramètre a doit être de préférence de la famille (hko), (oko), (hoo). Nous avons choisi deux méthodes de couples des pics :

a) la méthode du couple(300) - (002), caractérisé par des pics bien individualisés, assez intenses et faciles à repérer.

La droite de corrélation établie par GULDBRANDSEN (1970) s'écrit :

y = 25.57 x - 185.000

où

 $y = % CO_2 (300) - (002)$ en poids $x = \Delta 2 \Theta$ (300) - (002)

soit pour y = $0 \% CO_2$, x = 7,234° 2 (fig. 27)

b) <u>la méthode du couple (004) - (410)</u>

Ce couple se situe vers le domaine des grands angles. La droite de régression établie par l'auteur a pour formule :

> y = 14.7361 x + 23.6341(fig. 27) $y = % CO_{2}$ en poids et $x = 2 \Theta$ (004)-(410)



(présent travail)

(d'après CHAABAN, 1978)

kk1	Fluorapat YN-28 (V ₃ Bassin de	ite c Dinant	Fluorapatit HERBOSCH <u>et</u> (1	e de Visé <u>al</u> . 979 <u>)</u>	Francolite de Foum-Selta Tunisie CHAABANI (1978)					
	d (A)	I								
100	8,145		8,12		8,15	11				
101	5,254		5,29		5,29	3				
200	4,045		4,059		4,04	5				
111	3,865		3,884		3,87	7				
002	3,436	60	3,454	60	3,45	42				
102	3,156	15	3,166	15	3,17	12				
210	3,055	30	3,072	30	3,05	14				
211	2,804	100	2,800	100	2,79	100				
112	2,789	50	2,781	50	2,78	70				
300	2,709	70	2,707	70	2,69	49				
202	2,630	30	2,632	30	2,62	28				
301	2,522		2,521		2,51	5				
212	2,284		2,287		-					
310	2,250	30	2,255	30	2,24	22				
311	2,128		2,142		2,13	6				
113	2,065		2,067		2,07	6				
222	1,937	30	1,944	30	1,93	6				
312	1,382		1,880		1,87	23				
213	1,836		1,841	30	1,84	12				
321	1,816		1,808	15	_	-				
410	1,767		1,774	15	1,76	14				
303	1,747		-	-	1,73	11				
004	1,720		1,727	18	1,71	15				
Teneur en par métho	n CO ₂),35 à),94 % CO ₂	0 à 0,80	% CO ₂	4,46 à 6 % C	°°2				
Couple ((004)-(410) 		H N N			3115				

Tabl. 16.- Données diffractométriques comparées des différentes apatites.

Appliquées à neuf échantillons de nodules phosphatés prélevés dans les différentes coupes étudiées, les deux méthodes de "couples des pics" choisis donnent les résultats suivants :

- pour le couple (300)-(002), ° 2 Θ varie de 7,24 à 7,27, soit de 0.12
 à 0,89 % de CO₂, avec une moyenne de 0,63 % de CO₂.
- pour le couple (004)-(410), °2 θ varie de 1.58 à 1,54 soit de 0,35 à 0,94 % de CO₂, avec une moyenne de 0,74 % de CO₂.

On constate que les résultats obtenus par les deux méthodes sont inférieures à 1 % de CO₂, ce qui est tout à fait en accord avec la formule chimique de la fluorapatite et confirme l'identification faite. Il ne s'agit donc pas d'une carbonate -fluorapatite, puisque pour celle-ci, les teneurs en CO₂ mesurées par cette méthode sont nettement supérieur_{es:}5 à 6 % CO₂ pour la carbonate fluorapatite du Cap Ortégal (LUCAS et al., 1978) et 4,46 à 6 % CO₂ pour celle de Foum-Selta Tunisie (CHAABANI, 1978).

Le tableau 16 donne les analyses diffractométriques comparées de différentes apatites.

Les minéraux accessoires associés au phosphate et à la silice dans les nodules phosphatés sont :

- les minéraux argileux : l'illite, la kaolinite et parfois la chlorite;
- les feldspaths alcalins ont la nature n'a pu être déterminée de façon certaine;
- les amphiboles (?).

L'analyse par diffraction des Rayons X de la roche totale par la méthode des poudres désorientées montre que les carbonates sont pratiquement absents dans les nodules. Le maintien de l'apatite sous sa forme uniquement fluorée est probablement lié à cette absence de sources d'ions CO_3^{--} susceptibles de se substituer à PO_4^{3-} dans le réseau de la fluorapatite pour donner la francolite.

Il est à noter que la pyrite et la glauconie sont totalement absentes dans les nodules phosphatés.

De cette étude minéralogique, deux faits importants sont à retenir : 1) la constance de la composition minéralogique des nodules quelle que soit leur localisation stratigraphique ou géographique;

 l'identité remarquable de cette composition avec celle des schistes dans lesquels ils sont empâtés.

-96-
Cette dernière observation permet de penser que la boue marine à radiolaires et le matériau organo-détritique lapidifié en schistes par les transformations diagénétiques, constituaient initialement un même et unique dépôt au sein duquel le phosphate, mais aussi l'uranium, se sont accumulés.

3.3. Essai de classification des nodules

L'air de famille que présentent les nodules phosphatés ainsi que la constance de leur composition minéralogique masquent l'existence d'une grande diversité au sein de ces roches. On peut les repartir entre deux pôles, en fonction de leurs caractères pétrographiques et minéralogiques, ainsi qu'en fonction de l'abondance et de l'état de fossilisation de leur microfaune de radiolaires.

- les nodules phosphatés non chargés en matières organiques, sans aucune différenciation interne, l'apatite s.l. est intimement associée à la matière organique et les radiolaires sont peu reconnaissables. A ce type correspond les nodules des niveaux WPP-5 (fig.10) et BN-4 (fig.12).
- l'autre pôle est formé par les nodules phosphatés bruns où les matières organiques, entièrement épigénísées en phosphate ne persistent qu'en des rares tâches noiresdisséminées dans la roche; ils sont généralement pourvus d'un nucléus plus ou moins différencié et où les trois faciès phosphatés sont souvent associés. Les radiolaires très abondants sont en bon état de conservation. Les nodules des niveaux WPP-4 (fig.10) et BN-3 (fig.12) appartiennent à ce type.

Entre ces deux pôles extrêmes, il existe de nombreuses variétés intermédiaires.

Il apparait que ces différents types de nodules dépendent dans une large mesure de leur situation stratigraphique et que dans un même niveau, tous les nodules ont les mêmes caractères pétrographiques. Sur la base de ces observations, nous avons tenté une corrélation à courte distance entre les niveaux à nodules phosphatés de la coupe de Warnant et ceux de la coupe de Bioul (fig : 25) 3.4. Autochtonie des nodules phosphatés

On a vu que les nodules phosphatés sont riches en radiolaires, alors que les schistes dans lesquels ils sont empâtés, sans exception en sont pauvres. Cette différence peut laisser penser que les nodules n'ont pas été engendrés au cours du dépôt. Toutefois, l'étude approfondie des nodules et des schistes que nous venons de réaliser fournit des arguments en faveur d'une autochtonie des nodules :

- la conservation des radiolaires et l'absence d'incrustations organiques excluent toute idée de remaniement et tendent à démontrer qu'ils sont restés enfouis dans les dépôts qui leur ent donné naissance;
- l'absence de radiolaires dans les schistes peut s'expliquer par les transformations post-sédimentaires ayant affecté les schistes et qui ont détruit la totalité de la faune des radiolaires;
- l'identité totale de la composition minéralogique (principalement celle des fractions argileuses) des nodules et des schistes, ainsi que l'absence du quartz détritique militent en faveur d'une origine commune de ces deux lithofaciès;
- l'enrichissement général en phosphate de toutes les roches dans la partie supérieure du V₃c montre bien l'importance de la phosphatogenèse durant cette période de transition et, par conséquent, la possibilité d'une différenciation des nodules phosphatés in situ

Néanmoins, on doit admettre l'existence d'une étape de diagenèse précoce au cours de laquelle les nodules se seraient formés, permettant ainsi la fossilisation et la préservation de la faune des radiolaires.

3.5. <u>Teneurs en matières réductrices, en P₂0₅ et en carbonates des nodules</u> phosphatés

a) Les matières réductrices *

Les résultats d'analyse des matières réductrices dans plusieurs nodules de provenances géographiques et stratigraphiques différentes (tabl. 17) sont très variables. Ils confirment les observations

Toutes les analyses des matières réductrices et des phosphates ont été faites sur des ensembles de nodules broyés ayant servi à l'analyse en spectrométrie et non sur des nodules isolés.

Référence	Age et localisation		N° des échantillons	U (ppm)	₽ ₂ 0 ₅ %	M.R. Milli-équiv. ^K 2 ^{Cr} 2 ⁰ 7	
Présent	Viséen sup. (V ₃ c) Bassin de Dinant Ardenne Belge	Bioul Poilvache Warnant	WPP-1 WPP-5 YN-5 YN-28 BN-3 BN-4 HW-AN ₁	67,20 39,00 88,10 55,50 66,70 67,70 95,00	23,00 12,00 20,50 15,30 30,01 20,86 19,60	1,40 1,20 0,60 0,50 2,40 3,40 1,20	
travail		Haut - le - Wastia	HW-AN ₂ HW-P ₁ HW-P ₂ HW-P ₅ HW-P ₉	186,00 57,50 61,20 132,00 121,00	9,10 11,90 18,50 6,70 9,60	2,60 1,00 1,20 3,20 2,40	
			Schistes encaissants	8 à 177 ppm	0,50 & 8 %	0,60 à 2,70	
PAPROTH et ZIMMERLE (1980)	Carbonifère inf. Mo n tagne du Harz (R.F.A.)		Nodules phosphatés Schistes encaissants	15 à 150 ppm 0,2 à 32 ppm	20 à 30 % Très faible par rapport aux nodules	1,8 à 2,8 % de C. org. n. d.	
ROUTHIER (1963) (Tome III) RAGUIN 1961	Carbonifère inf. Montagne Noire et Pyrénées (France)		Nodules phosphatés Schistes encaissants	20 à 30 ppm n.d.	15 à 30 % Atteint 10%	n.d. n.d.	

Tabl. 17.- Résultats d'analyses des nodules phosphatés comparés à ceux des autres nodules phosphatés d'Europe

microscopiques et traduisent l'extrême hétérogénéité de la distribution de celles-ci déjà observée dansles schistes encaissants de ces nodules.

b) Teneurs en $P_2 O_5 \pm$

L'examen du tableau des résultats montre que dans les nodules, les phosphates sont aussi inégalement répartis que dans les schistes, bien que les teneurs y sont nettement plus élevées (tabl. 17). Ces teneurs sont comparables à celles des autres nodules phosphatés d'âge carbonifère de la Montagne Noire et des Pyrénées (France) et de la Montagne du Harz (R.F.A.) (Tabl. 17).

c) Teneurs en carbonates

La teneur en carbonate dans l'ensemble des nodules de la série V₃c est extrêmement faible, voisine du zéro; elle n'a pas pu être déterminée par la méthode calcimétrique utilisée. Ce résultat est tout à fait compatible avec l'étude minéralogique (absence de phosphate carbonate fluorapatite).

4. Genèse des phosphates dans le V₃c

L'enrichissement en phosphate du V₃c est certainement lié à la précipitation directe des phosphates de Ca au sein des dépôts argiloorganiques, à partir des eaux interstitielles très enrichies en phosphore. De nombreux auteurs (CHARLES, 1953; BELINKO, 1969; BATURIN <u>et al.</u>, 1972; BURNETT, 1977; O'BRIEN et VEEH, 1980 ...) ont démontré la réalité de cette précipitation et ont insisté sur les conditions biochimiques, sédimentologiques et paléogéographiques assez strictes qui régissent l'accumulation des phosphates.

La plupart de ces conditions semblent avoir été réunies dans le cas qui nous occupe.

Le premier facteur déterminant correspond au caractère restreint du mil**ieu dans** lequel les couches de passage du Viséen - Namurien se sont déposées. En effet, le V₃c n'est connu que dans le seul bassin de Dinant et et dans l'extrémité ouest du bassin de Namur.

Les autres facteurs favorables à la précipitation du phosphate ont été les suivants :

- le V₃c est une période de calme géologique encore marquée par la stabilité des conditions paléogéographiques;

- la sédimentation extrêmement ralentie de cette série de transition, liée à l'absence d'apports détritiques ainsi que le développement d'une condensation très forte affectant les dépôts;
- l'existence d'une lacune de stratification au sommet du $V_{3}c$;
- le caractère néritique du domaine de sédimentation et la richesse de celui-ci en matières organiques probablement de type sapropélique, provenant de nombreux organismes végétaux et animaux dans la zone littorale.
 C'est aussi dans ces organismes que se situe l'origine du phosphore, en saturation dans le milieu

La conjonction de tous ces facteurs a été favorable non seulement à la précipitation et à l'accumulation des phosphates, mais aussi au piégeage de l'uranium.

IV - ETUDE DES NIVEAUX ARGILEUX DU V₃b **X** - V₃c_

Dans la coupe d'Anhée, nous avons décrit quelques lits d'argiles de teinte grise, jaune ou blanchâtre, de 5 à 30 cm d'épaisseur, ainsi que quelques niveaux de calcshistes, insérés entre les bancs calcaires, bien stratifiés du V_3 b \checkmark et du V_3 c inférieur (fig. 13).

L'application de la diffraction des rayons X montre que ces argiles sont constituées d'illite mal cristallisée de kaolinite et d'intestratifiés (10 - 14 s) en proportions sensiblement équivalentes. La chlorite est également présent@ mais en quantité plus faible (fig. 23). Le quartz, en quantité très faible, est le seul représentant de la fraction non argileuse.

Les calechistes présentent une composition minéralogique argileuse identique à celle des schistes du V_3^{c} : illite bien cristallisée (95 % de la fraction argileuse) kaolinite et chlorite à l'état de traces.

La répartition des radioéléments dans ces horizons argileux sera discutée en relation avec leur composition minéralogique.

V - ETUDE DES SCHISTES NAMURIENS

Ce sont des roches détritiques terrigènes typiques, caractérisées par la présente et l'abondance des grains de quartz clastiques, plus ou moins bien arrondie et bien visibles au microscope, ce qui les différencie des <u>silicites</u> du V_3^{c} . L'abondance du quartz est telle que certains horizons sont de véritables schistes gréseux.

L'étude en diffraction des Rayons X indique que l'illite est le constituant essentiel de la fraction argileuse (presque 100 % de celles-ci . La chlorite et la kaolinite, quand elles sont présentes, sont à l'état de trace. La smectite apparait aussi sporadiquement, mais en proportion très faible. En plus de quartz, la fraction non argileuse renferme des feldspaths à l'état de traces.

Les minéraux d'origine chimique, en particulier les phosphates sont pratiquement absents.

CHAPITRE IV - <u>RELATIONS ENTRE TENEURS EN</u> <u>RADIOELEMENTS ET LES DONNEES</u> <u>PETROGRAPHIQUES, MINERA-</u> <u>LOGIQUES ET GEOCHIMIQUES</u>

I - ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES RADIOELEMENTS DANS LES FACIES SCHISTEUX ET ARGILEUX

1. Généralités

Avant d'examiner les relations éventuelles exist ant entre les teneurs en U-Th-K et la nature pétrographique et minéralogique dans ces faciès, il est nécessaire de rappeler brièvement les grands traits du comportement géochimique de chacun de ces radioéléments. Le comportement géochimique de l'uranium ayant déjà été développé dans le chapitre introductif, on ne s'intéressera ici qu'au thorium et au potassium.

On sait qu'au cours de l'altération et du lessivage des roches, 90 % du thorium peuvent être facilement déplacés. Cependant, étant extrêmement peu soluble et la plupart des minéraux thorifères étant très stables, la quasi-totalité du thorium transite, soit fixé dans le réseau de certains minéraux lourds, soit en suspension, adsorbé sur les argiles : de ce fait, le thorium caractérise la fraction "détritique" des sédiments (SERRA, 1979).

Le potassium se trouve à l'origine dans certains évaporites et les silicates (feldspaths alcalins et micas par exemple).L'altération de ces derniers entraîne sa libération et son passage en solution d'où il est adsorbé par les particules fines des sédiments(HASSAN et HOSSIN 1975).

2. Représentation U-Th-K

En se fondant sur de telles différences de comportements géochimiques de l'U, du Th et du K, QUINIF Y., CHARLET J.M. et DUPUIS Ch. (à paraître) proposent de nouvelles méthodes de représentation qui permettent d'utiliser ces radioéléments comme traceurs de divers types de phénomènes et comme marqueurs de certains faciès sédimentaires (QUINIF <u>et al</u>. article sus-cité).

Ces représentations sont basées sur le diagramme Th/U-U/K $_2^0$ et sur la relation Th-K $_2^0$.

La représentation Th/U-U/K $_2$ 0 met en évidence une loi à laquelle obéissent la majorité des roches détritiques :

 $U/K_2^0 = a (Th/U)^b$ (1). C'est un hyperboloïde de la forme Y = ax^b , asymptotique à l'infini pour x = o. Elle est caractérisée par les valeurs des coefficients a et b spécifiques des faciès. L'analyse de la relation (1) montre que le coefficient a exprime la manière dont varie l'uranium et le thorium par rapport au potassium. Plus a est grand, moins le K aura de "poids" par rapport à l'U. Le coefficient b démontre que l'U est une variable indépendante ou non des deux autres radioéléments;(si b = 1, U peut peut être éliminé de l'équation (1)).

La relation Th - K_2^0 est linéaire et s'écrit :

$$fh = c (K_2 0) + d (2)$$

Elle exprime une propriété géochimique de certaines argiles mais elle est d'application moins générale que la première (1).

L'utilisation de ces deux équations conduit à un classement des roches détritiques selon la nature et l'origine de leur minéraux (altérations continentales), le transport, le mode de dépôt, les conditions physicochimiques de sédimentation. Cette méthode permet en outre de comprendre les anomalies uranifères et constitue ainsi un cadre de traitement des mesures de spectrométrie inaturelle (QUINIF et al. article sus-cité). Le lecteur soucieux de plus de détails se refèrera à l'article précité.

En s'appuyant sur ces modes de représentation, nous allons maintenant analyser et discuter l'ensemble des données radiométriques obtenues par spectrométrie δ dans les trois ensembles détritiques précédemment décrits : niveaux argileux du $V_3 b \delta$ et $V_3 c$, schistes du $V_3 c$ et schistes namuriens. L'étude sera faite dans cet ordre afin de suivre l'évolution de la distribution des radioéléments en fonction de la succession des dépôts dans le temps. 3. <u>Analyse de la distribution des radioéléments dans les lits argileux</u> <u>du V₃b_et V₃c_</u>

La sédimentation dinantienne n'a pas été continue, tout au moins au cours du Viséen supérieur; elle a été ponctuée par des arrêts brutaux immédiatement suivis par une accumulation de matériel détritique argileux. La reprise de la sédimentation carbonatée se fait également de manière brutale. Malgré leurs faibles épaisseurs, ces niveaux argileux interstratifiés dans les calcaires apportent des informations précieuses.

- a) l'examen de la fraction argileuse montre qu'il existe une corrélation très étroite entre la kaolinite et l'illite. Le coefficient de corrélation calculé, r = 0.94 est hautement significatif : il semble démontrer que la kaolinite qui varie en sens inverse de l'illite (fig. 28), résulterait de l'altération des minéraux micacés. En outre l'abondance de cette kaolinite témoigne de l'importance de la pédogenèse, favorisée par un climat vraisemblablement de type tropical, c'est à dire chaud et humide.
- b) par ailleurs, si la forte concentration du Th constitue une preuve absolue de la nature détritique de ses dépôts, l'étude de la relation Th-K₂0 ne montre cependant pas de corrélation entre ces deux radioéléments (fig. 29). Ce phénomène peut s'expliquer par une évacuation préférentielle très importante du potassium par les eaux de lessivage, tandis que le thorium, beaucoup plus résistant, demeure lié aux matériaux détritiques et transite au sein de ceux-ci dans le milieu de sédimentation.
- c) il existe une bonne corrélation entre les teneurs en uranium et la proportion de kaolinite, (coefficient r = 0.65). Cette corrélation suggèrerait une préconcentration pédogénétique de l'uranium et démontrerait donc son origine continentale. L'équation de la droite de corrélation s'écrit : Y = 0.3947 x + 4.5174 (fig. 30).

L'existence d'une ordonnée à l'origine assez élevée permet de penser qu'une partie de l'uranium n'est pas lié au phénomène de préconcentration; elle pourrait provenir du milieu de sédimentation, à partir des eaux interstitielles.

d) L'utilisation de la représentation U/K_2^0 - Th/U permet deux types d'observation :

-105-





 $\left(\begin{array}{c} \partial U \\ \partial U \\ \partial u \end{array} \right)$

- les calcschistes A-163 et A-165 obéissent à la loi en puissance

$${}^{\rm U}/{\rm K}_{2}^{\rm 0} = a ({\rm Th}/{\rm U})^{\rm b}$$

ces deux échantillons se situent en effet sur la courbe porteuse (fig.31). Ils se comportent exactement comme les schistes reviniens.

schistes reviniens.

- par contre, les niveaux argileux ne vérifient pas parfaitement la relation (1). On remarque d'abord que le niveau A-126, stratigraphiquement situé vers la base du V₃b**^{*}**, semble se comporter comme une argile normale; elle se situe dans la zone où les rapportsU/K₂0 et Th/U sont sensiblement équivalents, mais en léger retrait par rapport à la courbe porteuse.

Par contre, à cause de leurs temeurs élevées en uranium, les argiles des niveaux A-151, A-151b et A - 167 montent considérablement vers les plus fortes ordonnées, se distinguant ainsi des argiles tertiaires belges.

Par ailleurs, ces mêmes niveaux se comportent comme les argiles kaolinitiques du Wealdien du bassin de Mons, montrant, comme ces dernières, leur tendance à l'anomalie uranifère (fig. 32).

4. Analyse de la distribution des radioéléments dans les schistes du V₂c

Les études en lames minces et l'application de la diffraction des Rayons X ont montré l'homogénéité lithologique de cette série, faisant de celle-ci une grande unité géochimique. Toutefois, la présente étude sera menée en considérant séparemment les différentes coupes qui y ont été levées. Une telle démarche vise à mettre en évidence les variations géochimiques et radiométriques qui interviennent dans l'espace au sein de cette formation.

4.1. Etude de la relation Th-K₂0

Les schistes du V_3^c se caractérisent entre autres faits, par leur extrême pauvreté en Th et en K (voir tabl. 7 à 10 des résultats d'analyse par spectrométrie \mathbf{v}). Ces anomalies négatives en Th et en K ainsi que l'absence totale de matériaux détritiques, principalement de quartz clastique, prouvent que les schistes du V_3^c ne sont pas des roches détritiques s.s., c'est-à-dire formées de débris issus directement de l'érosion d'un continent. Ils seraient le résultat d'une floculation et d'une précipitation des particules argileuses colloïdales, associées à une sédimentation chimique intense (précipitation des phosphates et de la silice d'origine chimique ou biochimique).



-108-





BUS

Dans la coupe de Poilvache, il existe une bonne corrélation entre Th et K_2^0 (fig. 33). Le coefficient de corrélation r = 0,91 pour 27 échantillons analysés.Cette relation très étroite démontre que les anomalies négatives en Th et K sont dues au même phénomène : l'absence d'apports détritiques en provenance du continent, liée probablement à une période de biostasie comme l'atteste la présence de nombreux débris de plantes recueillis dans cette série.

L'analyse des résultats des coupes de Warnant et de Modave conduit aux mêmes conclusions. Toutefois, dans ces derniers, les corrélations entre Th et K_2^0 sont moins bonnes. Dans la première coupe (Warnant), le coefficient de corrélation r = 0.61. Cette atténuation de la corrélation s'explique par la prise en compte dans l'analyse des résultats des calcaires associés aux schistes dans cette coupe (fig. 34). A Modave, la baisse est encore plus importante, avec r = 0.44. L'explication pourrait être recherchée dans le phénomène d'altération qui affecte la série schisteuse de cette coupe, à l'affleurement.

4.2. Application de la relation $U/K_2 0 = a (Th/U)^b$

L'utilisation de la représentation Th/U - U/K₂0 montre que les schistes du V₃c vérifient la loi en puissance ci-dessus. Le tableau 18 donne les valeurs des paramètres a et b et du coefficient de corrélation dans les deux principales coupes étudiées au niveau du passage Viséen-Namurien. Les fortes valeurs du coefficient a confirment l'extrême pauvreté en K par rapport à l'U alors que le coefficient b traduit l'indépendance relative de U par rapport à Th et K dans cette série de transition. Sur la courbe porteuse, ces schistes V₃c se situent vers les plus fortes ordonnées : ils traduisent ainsi l'importance de l'anomalie uranifère qu'ils renferment. Ils se distinguent très nettement des autres roches détritiques du Paléozoïque ardennais (fig. 35).

SCHISTES V3C		$\frac{U}{K_2^0}$	= a -	Th ^b U	(1) Th = c $K_2^0 + d$ (2)			
COUPES	'n	а	b	r	С	d	r	
WARNANT	13	6.79	-0.73	0.92	5.54	-1.07	0.85	
POILVACHE	26	8.85	-0.60	0.84	5.21	-1.56	0.91	

Tabl. 18 - Application de la relation $U/K_2^0 = a(Th/U)^b$: Valeurs des paramètres a et b et du coefficient de corrélation



5. Analyse de la distribution des radioéléments dans la série namurienne

La campagne de levés radiométriques avait mis en évidence l'existence d'une radioactivité très faible dans les schistes namuriens. L'analyse par spectrométrie **5** de quelques échantillons confirme ce fait bien que les niveaux surmontant directement le V₃c supérieur restent encore relativement uranifères (tabl. 10). Les teneurs en U-Th-K sont dans l'ensemble normales et très proches des valeurs moyennes du clarke pour ce type de roches détritiques s.s. (voir tabl. 1).

En raison du nombre réduit d'échantillons analysés, il n'est pas possible de faire des représentations spécifiques à cette série. Toutefois, le report sur le diagramme Th/U - U/K₂O (fig. 31) des résultats des quelques échantillons analysés montre que les schistes namuriens se situent exactement sur la courbe porteuse. Ils se comportent comme les schistes reviniens et comme les calcschistes de la série V_3 b \checkmark .

6. <u>Synthèse de la distribution des radioéléments dans les faciès schisteux du</u> bassin d'Anhée - Relations avec la lithostratigraphie.

La figure 36 récapitule l'ensemble des relations existant entre les différents radioéléments entre eux d'une part, et entre la distribution des radioéléments et la composition minéralogique des séries schisteuses et argileuses d'autre part, dans le bassin d'Anhée. On constate en particulier l'absence de corrélation entre la distribution de l'uranium et la composition minéralogique argileuse de la série V₃c tant qualitativement que quantitativement. On en conclut que l'uranium n'y est pas piégé par les particules argileuses. Il apparaît cependant que le développement de l'anomalie uranifère dans cette série coïncide avec celui de la phosphatogenèse.

II - ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES RADIOELEMENTS DANS LES CALCAIRES

D'une manière générale, les carbonates bien cristallisés sont pauvres en uranium, avec une teneur moyenne de 2 ppmU (voir Tabl. 1 des clarkes). Cette absence d'uranium est souvent expliquée par son incapacité à s'introduire dans les réseaux de la calcite et de la dolomite (MUCHEMBLE, 1943 ; HASSAN et KHALED 1976...)



Pris dans son ensemble, le Dinantien de l'Ardenne fait exception à cette règle. Il apparait en effet comme relativement uranifère, avec une teneur moyenne de 3,45 ppmU (CHARLET et al., Prospection autoportée 1979-1981). L'analyse en spectrométrie gamma de quelques échantillons prélevés dans sa partie supérieure (V_3 b**f** et V_3 c) confirme ce fait et met en évidence l'existence de véritables anomalies uranifères.

Nos investigations n'ont pas montré l'existence de critères pétrographiques ou minéralogiques pouvant différencier les termes calcaires uranifères des termes calcaires non porteurs de la minéralisation uranifère et susceptibles d'expliquer la concentration de cet élément. Il semble donc que les modalités du piégeage de l'uranium doivent être recherchées ailleurs.

Il est à rappeler que le Th et le K sont totalement absents de calcaires ce qui est normal pour des calcaires aussi purs, ne comportant aucune trace d'éléments détritiques.

III - ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES RADIOELEMENTS DANS LES NODULES PHOSPHATES

L'étude par diffractométrie de rayons X a montré que les nodules phosphatés sont plus ou moins chargés en argiles. La présence de cette fraction "détritique" aurait donc pu introduire une certaine quantité de Th et de K dans les nodules phosphatés. Les résultats de la spectrométrie gamma indiquent qu il n'en est rien . On en conclut que les argiles constituant les schistes du V₃c et celles formant la fraction détritique des nodules sont non seulement de même nature, mais aussi de même origine. Ce nouveau caractère commun ainsi que l'enrichissement en uranium des deux faciès constituent une preuve supplémentaire de l'autochtonie des nodules phosphatés.

Par ailleurs, si tous les types de nodules décrits sont uranifères, on constate que les teneurs sont variables en fonction de la situation géographique des coupes où ils ont été récoltés et, dans une même coupe, en fonction de leur situation stratigraphique. Cependant, il est pratiquement impossible de trouver une corrélation directe entre les teneurs en uranium et les données pétrographiques. Il n'y a pas non plus de relation entre le contenu en uranium des nodules et la composition minéralogique de leur fraction argileuse.

-113-

Néanmoins, étant donné le rôle bien connu joué par les matières organiques et les phosphates dans la fixation de l'uranium, en milieu sédimentaire, on peut penser que dans les nodules, c'est l'une ou l'autre de ces deux substances, ou les deux à la fois, qui sont porteuses de l'uranium. Cette hypothèse sera vérifiée dans la suite du travail.

IV - <u>RELATIONS ENTRE LES TENEURS EN URANIUM ET LA DISTRIBUTION DES</u>. <u>MATIERES</u> REDUCTRICES ET DES PHOSPHATES

1. Dans les schistes et calcaires de la coupe de Warnant

La figure 37 représente la distribution de l'uranium (courbe B), celle des matières réductrices (courbe C) et celle des phosphates (courbe A).

1.1. Relation uranium-matières réductrices

Dans la coupe de Warnant, on remarque que l'uranium et les matières réductrices varient dans le même sens, depuis les faciès carbonatée de base, jusqu'au milieu de la série schisteuse. Dans la partie supérieure, la corrélation s'estompe, alors que la sédimentation phosphatée se développe. Le report graphique des teneurs en uranium en fonction des teneurs en matières réductrices confirme bien qu'il n'a pas proportionnalité absolue entre ces deux éléments (fig. 38). Le coefficient de corrélation r = 0.64 pour les 25 échantillons des schistes et des carbonates, analysés, est moyen. On en conclut que les matières réductrices ne sont pas les seuls porteurs de l'uranium dans la série étudiée.

1.2. Relation uranium-phosphates

Les figures 37 et 39 montrent l'existence d'une certaine corrélation entre les teneurs en uranium et les teneurs en P_2^{0} , le coefficient de corrélation calculé vaut r = 0.76. Celui-ci est beaucoup plus élevé que dans le cas précédent, mais il reste moyen. Il n'y a donc pas de liaison très étroite, non plus entre l'uranium et la distribution des phosphates.

Il apparait donc que l'uranium n'est pas exclusivement lié à l'une ou l'autre de ces deux phases. Celles-ci semblent contribuer <u>toutes les deux</u> à la concentration de l'uranium. Une hypothèse génétique comportant trois étapes successives peut être retenue pour expliquer le déroulement de ce phénomène.

-114-



Fig: 37



-116-

BUS



1.3. Hypothèse génétique

a) Création d'un milieu réducteur

Comme on peut le constater, à Warnant, la fin de la sédimentation carbonatée n'est pas brutale, mais s'effectue par pulsations successives : d'où l'alternance des bancs calcaires peu épais avec des niveaux schisteux ou argileux.

Une telle alternance des roches de nature et de propriétés physicochimiques différentes constituent déjà en elle-même un facteur favorable à la concentration de l'uranium (ROUBAULT, 1965, Tome III).

Le milieu de sédimentation est alors caractérisé par un pH > 7,8 (limite de précipitation du calcaire) et par un potentiel d'oxydo-réduction inférieur à zéro (Eh \lt 0) du fait de la présence des matières organiques qui créent un environnement réducteur. L'uranium initialement maintenu en solution sous forme de complexe bi-ou tricarbonaté où il se trouve à l'état U⁶⁺ (voir chapitre introductif) est alors libéré du fait de la disparition du CO₂ dans la précipitation du calcaire. Le potentiel d'oxydo-réduction négatif l'amène définitivement à sa forme réduite U⁴⁺.

b) Fixation de l'uranium par les matières réductrices

L'uranium précédemment libéré et transformé sous sa forme réduite U⁴⁺ est ensuite fixé soit par adsorption, soit par formation des complexes par les matières réductrices en l'occurence les matières organiques. La présence et la dissémination de ces matières organiques dans les càlcaires expliquent donc l'enrichissement en uranium de ces derniers. Cette fixation de l'uranium par les matières réductrices est d'autant plus importante que la précipitation des phosphates est encore très insignifiante.

En outre, un autre mécanisme pourrait résulter d'une modification du rayon ionique qui passe de 0,80 Å (valence 6) à 0,97 Å (valence 4) et devient donc voisin de celui de Ca⁺⁺ : 0,99 Å

Il est alors possible d'envisager une précipitation de l'uranium avec le carbonate de calcium, par substitution isomorphique des ions Ca⁺⁺ par U⁴⁺. Cette dernière hypothèse expliquerait les fortes concentrations de l'uranium dans les calcaires.

c) Précipitation et fixation de l'uranium par les phosphates

Lorsque la précipitation des phosphates devient importante, une sorte de "compétition" s'installe entre ces derniers et les matières réductrices pour la récupération de l'uranium disponible contenu dans les eaux interstitielles. Dans cette "compétition", les phosphates apparaissent comme un meilleur fixateur de l'uranium que les matières réductrices. Le mécanisme de cette fixation est une adsorption qui conduit à la formation d'un composé isomorphique, suite à la substitution des ions Ca^{2+} par U⁴⁺ dans le réseau de l'apatite. Ce piegeage de l'uranium dans les phosphates implique un pH comprix entre 7 et 7.8 et un potentiel d'oxydo-réduction (Eh <0) si l'on se réfère à la figure 40 qui montre les dépôts sédimentaires chimiques dans leurs relations avec le pH et le Eh du milieu (d'après KRUMBEIN et GARRELS, 1952).



Fig. 40.- Association minéralogique en fonction du pH et du Eh (d'après KRUMBEIN et GARRELS, 1952).

En conclusion, il semble donc qu'au départ, les matières réductrices représentent le principal agent fixateur de l'uranium en solution. Ce rôle fixateur diminue lorsqu'on monte dans la série, au fur et à mesure que la sédimentation phosphatée se développe (apparition de nombreux niveaux de nodules phosphatés). Au sommet de la série, la fixation de l'uranium est essentiellement le fait des phosphates.

Il en résulte qu'il ne peut y avoir une proportionnalité absolue entre l'uranium et chacun de ces deux éléments. Par ailleurs, la paragenèse : matières organiques, phosphates, silice, uranium (fig. 40) permet, non seulement de caractériser le milieu des dépôts mais constitue aussi une preuve de l'origine syngénétique de l'uranium.

2. Dans la coupe de Poilvache

2.1. Relation uranium - matières réductrices

Dans cette coupe il ne semble exister aucune relation entre les teneurs en matières réductrices et l'uranium (fig. 41 et 42). Le coefficient de corrélation linéaire r = 0.21 pour 27 échantillons n'est pas significatif.

2.2. Relation uranium - phosphates

La figure 41 montre que, d'une manière générale, les teneurs en uranium et en P_2O_5 varient dans le même sens. Cependant, le coefficient de corrélation linéaire égal à 0.65 pour 27 échantillons est très moyen; il indique que la corrélation n'est pas absolue entre les deux variables. L'équation de la droite de corrélation s'écrit :

Y = 9,188 X + 18,629 (fig. 43)

Elle montre une ordonnée à l'origine très élevée qui exprime la part de l'uranium non liée aux phosphates.

En conclusion, on peut penser que la partie de la coupe de Poilvache qui a été étudiée appartient déjà à la zone de "compétition" entre les phosphates et les matières réductrices, l'uranium se fixant de préférence sur les phosphates.

3. Dans les nodules phosphatés

3.1. <u>Relation U - Matières réductrices et U - P₂O₅</u>

L'étude des teneurs en uranium en fonction des teneurs en matières réductrices ne montre aucune relation dans les nodules phosphatés. Les couples de points représentatifs ont tendance à rester parallèles à l'axe



Fig : 41 - Distribution de U - P_2O_5 et MR dans l'anomalie de Poilvache.



-122-





des abscisses (fig. 44).

De même, il ne semble pas exister de relation étroite entre les teneurs en P_2O_5 des nodules et leur enrichissement en uranium (fig. 45). Même si l'on écarte les trois échantillons à forte teneur en uranium (>100 ppm) provenant des anomalies de la coupe de Haut-le-Wastia, on obtient un coefficient de corrélation r = 0,32 pour 9 échantillons, donc pas significatif.

Cette absence apparente de corrélation linéaire ne traduit pas forcément l'inexistence absolue de toute relation entre l'uranium et les phosphates dans les nodules. En effet, l'étude minéralogique ayant révélé l'association de trois faciès différents d'apatite, dans les nodules, on peut penser à l'existence d'une liaison préférentielle, de l'uranium avec l'un ou l'autre de ces faciès phosphatés, plutôt qu'avec l'ensemble des phosphates, tels qu'ils ont été analysés. Dans le but de vérifier cette hypothèse et donc de déterminer les principales sources porteuses de l'uranium, une série d'analyses autoradiographiques sur des plaques minces taillées dans plusieurs nodules a été réalisée. Certaines lames minces ont été confectionnées en partie dans les schistes encaissants de façon à faire une étude comparée.

3.2. Etude autoradiographique des nodules phosphatés

Elle a été réalisée au moyen des détecteurs solides des traces nucléaires, qui sont des films à base de nitrate de cellulose fournis par KODAK. Les caractéristiques de ces films et la technique analytique utilisée ont été décrites au chapitre I de cette Troisième Partie. Appliqués contre la surface polie de la roche à étudier, ils permettent l'enregistrement des particules émises par les radioéléments contenus dans la roche, c'est-à-dire l'uranium, dans le cas qui nous intéresse.

L'étude a été effectuée sur les lames minces en vue de rendre possible à l'aide d'un microscope optique, la comparaison entre la pétrographie et la minéralogie et la répartition des traces des particules enregistrées par le détecteur.

L'analyse des autoradiographies a donné les résultats suivants : - les nodules phosphatés sont beaucoup plus enrichis en uranium que leur encaissant, comme la spectrométrie 7 l'avait déjà montré;



- dans les nodules, la matière phosphatée est, sans ambiguité, la principale source porteuse de l'uranium. Celui-ci y est à l'état diffus dans la masse du sédiment mais sa répartition n'est pas identique dans tous les nodules:
 - dans les nodules dont la teneur en uranium est inférieure à 100 ppm on observe une dispersion assez homogène des traces des particules Q à l'intérieur du périmètre du nodule analysé. Il n'y a donc pas de concentration préférentielle de l'uranium. Les nodules du niveau WPP-5 à Warnant, se rangent dans cette catégorie (Pl. 1, ph.E).
 - . dans ceux de la coupe de Haut-le-Wastia, particulièrement enrichis en uranium (HW - AN₂; HW P₅), on constate l'existence d'un certain gradient de concentration. La radioactivité a tendance à croître de la périphérie vers l'intérieur des nodules. Ce caractère est général pour tous les nodules appartenant à ces niveaux. On peut le lier à la prépondérance du faciès phosphaté cryptocristallin (collophanite) qu'on observe dans la partie centrale de ces nodules. Cependant, il est pratiquement impossible de préciser cette observation compte-tenu de la très forte imbrication des différents faciès phosphatés en présence.

Il résulte de tout ce qui précède que si dans les nodules la matière phosphatée constitue la source porteuse de l'uranium, il ne peut y avoir proportionnalité absolue entre les teneurs en uranium et en P_2O_5 , du fait de la concentration différentielle de l'uranium à l'intérieur d'un même nodule.

Les photos A,B,C montrent une zone riche en uranium avec une densité élevée des traces des particules α . La photo D prise dans le même nodule représente une zone moins radioactive située à la périphérie du nodule (nodule du niveau HW - AN₁).

CONCLUSIONS

L'ensemble des investigations entreprises dans ce chapitre permet de tirer plusieurs conclusions très importantes sur la répartition des radioéléments dans la série des couches de passage du Viséen-Namurien.

- 1. L'anomalie radiométrique stratiforme repérée dans cette formation correspond à une importante anomalie en uranium d'extension régionale;
- Les autres radioéléments naturels, le thorium et le potassium, sont pratiquement absents dans cette série; cependant, le thorium est abondant

dans les rares niveaux argileux séparant les bancs calcaires du V₃c inférieur et du V₃b**í** : ce qui démontre le caractère franchement détritique de ces horizons argileux.

- 3. Les anomalies négatives en Th et en K, l'absence totale du quartz clastique, suggèrent que les schistes du V_3 c ne constituent pas une série détritique s.s.; ils sont le résultat d'une floculation suivie d'une précipitation des particules argileuses colloïdales. En outre, la sédimentation chimique (phosphate, silice, d'origine chimique ou biochimique) est une autre caractéristique des schistes très homogènes du V_3 c.
- 4. L'uranium est concentré dans toutes les roches de la série : schistes, calcaires et nodules phosphatés et cela depuis la série des calcaires "Bleu Belge" (V₃b 7). Par contre, sa concentration dans les schistes namuriens est normale et voisine de la valeur de clarke pour les dépôts aussi détritiques.
- 5. L'ensemble des investigations montrent que :
 - l'uranium dans les argiles du $V_3 b \mathbf{x}'$ et du $V_3 c$ inférieur est lié à la kaolinite (r = 0,65);
 - dans le V_3^c , l'uranium ne présente pas de corrélation, ni qualitative, ni quantitative avec un minéral argileux particulier, mais reste très lié aux matières réductrices et surtout aux phosphates. Le coefficient de corrélation vaut r = 0,43 entre U et MR et r = 0,72 entre U et $P_2^{0}_{5}$ en faisant abstraction de l'influence des nodules phosphatés;
 - dans ces derniers, il semble que c'est la matière phosphatée qui est porteuse de l'uranium, cependant, le contrôle géochimique de l'uranium, dans cette famille pétrographique est difficile à établir en raison de la fixation sélective de l'uranium sur certaines phases;
 - par ailleurs, le problème posé par la concentration de l'uranium dans les calcaires purs du Viséen supérieur reste à résoudre, nos investigations n'ayant pas permis de préciser les mécanismes de ce phénomène. Dans les bancs calcaires du V₃c supérieur (coupe de Warnant), il apparait cependant que l'uranium y est lié aux matières réductrices et donc principalement aux matières organiques;

- 6. L'association U P₂O₅ MR, à laquelle s'ajoute la silice, que l'on rencontre dans les schistes, mais aussi dans les nodules, suggère une origine syngénétique de l'uranium. Elle permet en outre de préciser les conditions du milieu de sédimentation : celui-ci était caractérisé par un pH compris entre pH = 7 et pH = 7,8 et par un potentiel d'oxydo-réduction fortement négatif (Eh<O) (voir fig. 40 d'après KRUMBEIN et GARRELS 1952). L'absence d'apports détritiques (anomalies en Th et en K), la sédimentation très ralentie, le caractère restreint peu profond et calme de ce même milieu (bonne fossilisation des radiolaires et des restes végétaux), le phénomène de condensation, ont été les facteurs déterminants de la précipitation des phosphates et de l'enrichissement en uranium.</p>
- 7. Enfin, ni l'étude en lames minces, ni l'application de la diffraction des rayons X, ni les analyses autoradiographiques n'ont montré la présence des minéraux uranifères, bien définis dans la série étudiée : l'uranium est partout à l'état diffus.

MULTIVARIABLE

ΕN

MODE

I - INTRODUCTION

Les résultats analytiques que nous avons obtenus forment un ensemble de plus de 800 valeurs numériques. En raison de ce nombre important de données et du caractère interdépendant de celles-ci, le seul examen de la matrice des données et la simple recherche de quelques corrélations linéaires particulières ne peuvent conduire qu'à une synthèse assez fragmentaire. Il est alors apparu utile de recourir à une technique fréquemment utilisée en statistique pour manipuler de grands ensembles de données : l'analyse factorielle.

II - GENERALITES SUR L'ANALYSE FACTORIELLE

Les techniques de l'analyse factorielle ont été initialement utilisées dans le domaine de la psychologie. L'apparition des ordinateurs a permis un développement de l'analyse factorielle dans de nombreux domaines tels que l'économie, la physique, la chimie et la géologie. Nous ne donnerons qu'un très bref aperçu de cette technique dont les détails peuvent être trouvés dans de nombreux ouvrages recensés par HERBOSCH (1974) dans la bibliographie de son article sur la répartition de l'uranium dans le bassin de Lodève.

Le point de départ de toute analyse factorielle est une matrice de données de dimensions n x N, correspondant à n variables mesurées dans N échantillons. L'objectif de l'analyse factorielle est d'extraire sous une forme condensée la plus grande part possible de l'information contenue dans la matrice des données. Elle détermine les relations entre les variables et (ou) entre les échantillons dans un ensemble apparemment complexe d'observations. Pour cela, elle effectue des classifications ou des regroupements au niveau des variables et (ou) des échantillons sur base de leurs coefficients de corrélation mutuels.

D'ANALYSE STATISTIQUE

Il est alors possible de définir pour chacun des groupes de la classification ainsi formée, une variable théorique plus générale appelée facteur ou "super-variable" (LECOMTE, 1975). Les facteurs sont fonction linéaire des variables initiales, en nombre très inférieur à celles-ci et qui suffisent à expliquer un pourcentage élevé de l'information initiale. Les facteurs sont interprétés en termes de processus géologiques ou géochimiques, mettant ainsi en évidence des phénomènes plus ou moins fondamentaux ayant influencé le comportement de variable tels que : la nature et la vitesse de sédimentation, les processus diagénétiques, l'éloignement du rivage, le pH, etc... (HERBOSCH, 1974). En outre, l'analyse factorielle permet une représentation spatiale des classifications ou des regroupements élaborés.

III - APPLICATION DE L'ANALYSE FACTORIELLE

1. Principales étapes de l'analyse factorielle

L'analyse factorielle a été réalisée à partir d'une matrice des données comportant 8 variables mesurées sur 54 échantillons de schistes et calcaires - et sur 7 variables dosées sur 12 échantillons de nodules phosphatés. Les résultats des analyses minéralogiques, en raison de leur caractère semi-quantitatif, n'ont pas été pris en compte dans le programme de traitement. Toutefois, lorsqu'ils semblaient présenter un intérêt, des reports manuels de ceux-ci ont été effectués.

La méthode d'analyse factorielle utilisée pour notre étude a été élaborée et programmée par le Laboratoire d'analyse numérique et statistique de la Faculté Polytechnique de Mons^{*}. Les étapes essentielles du processus mathématique sont les suivantes :

- à partir de la matrice des données, établissement de la matrice de corrélation entre variables;
- calcul des "d" valeurs propres $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_d)$ de cette matrice et calcul des vecteurs Uk pour les variables et Vk pour les échantillons $(k = 1, 2, \dots, d)$.
- calcul des contributions de chaque échantillon et de chaque variable aux différents facteurs;
- représentation graphique des échantillons et des variables par rapport aux vecteurs propres (ou facteurs) dans un espace à "d" dimensions.

La réalisation pratique de ce traitement informatique n'a pu être effectuée que grâce à l'amabilité et à l'intervention directe de M. LIBERT du Service de Statistique Appliquée de la Faculté Polytechnique de Mons. Je tiens à lui adresser mes très sincères remerciements.
2. Résultats de l'analyse factorielle

Dans le but de faire apparaitre toutes les influences qui ont pu jouer sur la distribution des radioéléments dans le V_3^c , plusieurs cas ont été envisagés puis étudiés en détail. Nous avons d'abord considéré séparemment les coupes de Warnant et de Poilvache, afin de vérifier les interprétations et les conclusions du chapitre précédent. Ensuite, l'analyse a été menée en considérant les faciès. Les cas suivants ont été examinés :

- faciès schisteux uniquement,
- nodules phosphatés uniquement,
- schistes et calcaires,
- schistes, calcaires et nodules phosphatés.

2.1. Analyse de la coupe de Warnant

Pour l'étude de ce premier cas par analyse factorielle, nous avons retenu une solution à deux facteurs extrayant 82 % de la variance totale des données initiales.

Le tableau 19 représente la matrice des coefficients de corrélation entre les 8 variables.

	U	Th	K	Um	P ₂ ⁰ 5	.≻ſR	<u> </u>	Uŕ
1) U 2) Th	1,00 -0,03	1,00 1,00						
3) K	0,00	0,61	1,00					
4) Um 5) P ₂ 0 ₅	1,00 0,75	-0,06 -0,07	-0,01 -0,11	1,00 0,76	1,00			
6) MR	0,64	0,16	0,22	0,64	0,52	1,00		
7) CO ₃	-0,55	-0,39	-0,54	-0,55	-0,39	-0,81	1,00	1 00
0) UI	0,94	-0,08	0,05	0,95	0,77	0,70	0,55	1,00

Tabl. 19 : Matrice des coefficients de corrélation entre les variables.



Fig: 46



Plusieurs gmands traits apparaissent dans ce traitement mathématique; ils confirment dans l'enmemble les acquis du chapitre précédent :

- l'existence d'une corrélation étroite entre Th et K (coefficient de corrélation r = 0,61);
- l'uranium présente de bonnes corrélations avec les matières réductrices (M.R.) d'une part, avec les phosphates (P₂O₅) d'autre part;
- la distribution de la radioactivité est absolument représentative de la distribution de l'uranium, le coefficient de corrélation r = 0,95 étant hautement significatif. De même l'uranium métal (Um) et l'uranium (en ppm) correspondent à une même variable (r = 1);
- une observation nouvelle est constituée par l'existence d'une corrélation moyenne entre P205 et M.R. (le coefficient de corrélation linéaire r = 0,51). Cette dernière corrélation permet de déduire une association triangulaire U P205 -M.R..Celle-ci reflête non seulement la fixation de l'uranium par les matières réductrices et les phosphates, mais aussi le rôle joué par les matières réductrices comme l'un des facteurs déterminant



pour la précipitation et la concentration des phosphates tels qu'on les observe dans la coupe de Warnant (présence de nombreux niveaux de nodules phosphatés).

 il apparait aussi une opposition nette, mais normale, entre le doublet Th-K, marqueurs de la phase détritique et les concentrations en CO₃⁻⁻ et en P₂O₅ représentants de la sédimentation chimique dans la série étudiée.

Par ailleurs, le plan des facteurs $F_1 - F_2$ (fig. 47) qui résume l'ensemble de tous ces résultats montre le caractère particulier de l'échantillon WP-48 au sein de la série schisteuse de cette coupe. Par sa forte teneur en Th et par sa composition minéralogique argileuse, il tend à montrer une origine purement détritique comme les niveaux argileux décrits dans la coupe d'Anhée. Cependant, il présente, par rapport à ces derniers, des pics de diffraction de rayons X de forme totalement différente. Ce fait pourrait être le reflet de la différence des transformations diagénétiques subies par les schistes du V₃c supérieur et les niveaux argileux inférieurs.





0.860

2.2. Analyse de la coupe de Poilvache

L'application de l'analyse factorielle à ce cas montre quelques différences par rapport au cas précédent. Nous avons retenu du traitement informatique une matrice à deux facteurs exprimant 70 % de l'information totale initiale. Le facteur F₁ oppose le doublet Th-K au doublet U-P₂O₅. Par ailleurs les éléments de chaque doublet sont très fortement corrélés: le coefficient de corrélation, r = 0,91 entre Th et K, il vaut r = 0,66 entre P₂O₅ et U.

	U	Th	K	Um	P205	MR	co ₃	Ur
1) U	1,00							, , ,
2) Th	-0,57	1,00						
3) K	-0,49	0,91	1,00					
4) Um	0,99	-0,57	-0,52	1,00				
5) P ₂ 0 ₅	0,66	-0,50	-0,44	0,65	1,00			
6) MR	0,19	-0,12	-0,09	0,21	0,06	1,00		
7) CO ₃	0,01	0,02	0,08	-0,02	0,00	0,15	1,00	
8) Ur	0,95	-0,60	-0,50	0,94	0,75	0,14	0,04	1,00

Tabl. 20.- Matrice des coefficients de corrélation entre variables.

Par rapport au cas de la coupe de Warnant, il apparait une diminution de l'intercorrélation U-MR (r = 0,21); entre MR et P_2O_5 il n'y a pratiquement plus de corrélations : r = 0,06. La baisse de l'intercorrélation U-MR peut s'expliquer par le rôle inhibiteur joué par les phosphates qui sont meilleurs fixateurs de l'uranium que les matières réductrices. Par contre, l'absence de corrélation entre P_2O_5 et MR parait difficilement explicable. Il est possible que ce phénomène soit lié aux variations locales de pH et Eh et à d'autres conditions physico-chimiques caractérisant le milieu de sédimentation.



Fig: 51

Enfin, on remarque que les deux échantillons de schistes namuriens Y_{II}^{a} et Y_{II}^{b} se distinguent très nettement des schistes V_{3}^{c} . La figure 49 représente l'ensemble de ces résultats.

2.3. Analyse des nodules phosphatés

L'étude par l'analyse factorielle de la matrice des données des nodules phosphatés n'a pratiquement pas donné de résultats nouveaux. On a simplement pu vérifier l'absence de corrélation mutuelle entre l'U et P_2O_5 . Par ailleurs, entre U et MR, la corrélation n'est pas significative (r = 0,27).

2.4. Etude de la série des schistes du V₂c

Dans ce cas, on considère uniquement les faciès schisteux des deux coupes précédemment étudiées. L'analyse factorielle montre la bonne fixation de l'uranium par les phosphates, par contre, le rôle fixateur des matières réductrices vis à vis de l'uranium n'est pas significatif (voir matrice des coefficients de corrélation, Tabl. 21).

Par ailleurs, la bonne corrélation entre Th et K est toujours vérifiée; elle traduit la covariance de ces deux radioéléments dans l'ensemble des faciès schisteux V₃c.

	U	Th	К	Um	P205	MR	^{CO} 3	Ur
1) U	1,00							
2) Th	-0,47	1,00						
3) K	-0,746	0,65	1,00					
4) Um	0,99	-0,49	-0,47	1,00	ł			
5) P ₂ 0 ₅	0,68	-0,42	-0,398	0,68	1,00			
6) MR	0,25	-0,20	-0,18	0,27	0,13	1,00		
7) CO3	-0,23	0,19	0,18	-0,24	-0,17	-0,22	1,00	
8) Ur	0,92	-0,54	-0,42	0,93	0,77	0,24	- 0,31	1,00
	~~	ł						

Tabl. 21.- Matrice des coefficients de corrélation entre les variables.

La représentation graphique des contributions aux facteurs pour les variables et les échantillons (fig.51) montrent la totalité des observations.



-138-

Fig: 52







-10-



Par rapport au cas précédent, la matrice initiale comporte en plus des données relatives aux calcaires. L'application de l'analyse factorielle donne les résultats regroupés dans la matrice des coefficients de corrélations mutuelles entre les différentes variables (tabl. 22) et dans les figures 52 et 53.

	U	Th	К	Um	P205	MR	co ₃	UR
								
1) U	1,00							
2) Th	-0,28	1,00			}			
3) K	-0,20	0,68	1,00					
4) Um	0,99	-0,30	-0,21	1,00				
5) P ₂ 0 ₅	0,71	-0,28	-0,21	0,72	1,00			
6) MR	0,42	0,00	0,11	0,43	0,28	1,00		
7) CO ₃	-0,41	-0,27	-0,41	-0,41	-0,31	-0,56	1,00	
8) Ur	0,94	-0,31	-0,13	0,94	0,79	0,44	0,47	1,00
					1			

Tabl. 22.- Matrice des coefficients de corrélation entre variables.

Par rapport au cas des schistes, on remarque que l'addition des calcaires améliore les corrélations entre l'uranium et P_2O_5 d'une part (le coefficient de corrélation passe de r = 0,68 à r = 0,72) et entre U et MR d'autre part (r varie de 0,27 à 0,43). Cette observation démontre que dans les calcaires, l'uranium lié aux phosphates, l'est davantage encore aux matières réductrices.

2.6. Etude de l'ensemble des faciès du V₂c : schistes, calcaires et nodules

C'est le cas général. La matrice initiale des données rassemble tous les résultats analytiques sur les schistes, les calcaires et les nodules phosphatés. Sept variables seulement ont été prises en compte dans le traitement analytique, la radioactivité globale mesurée in situ étant très représentative des teneurs en uranium a été éliminée.

Pour l'étude de ce lot des données par analyse factorielle, nous avons retenu, comme dans le cas précédent, une solution à deux facteurs extrayant 73 % de l'information contenue dans la matrice des données.

-140-

	U	Th	K	Um	P ₂ ⁰ 5	MR	co3
1) U	1,00						
2) Th	-0,88	1,00					
3) K	-0,42	0,70	1,00				
4) Um	0,99	-0,26	-0,43	1,00			
5) P ₂ 0 ₅	0,46	-0,40	- 0,56	0,43	1,00		
6) MR	0,51	-0,05	- 0,12	0,52	0,25	1,00	
7) CO ₃	-0,38	-0,19	-0,22	-0,35	-0,23	-0,47	1,00

Tabl. 1..- Metrice des coefficients de corrélation entre les variables

Plusieurs grands traits apparaissant dans ce traitement informatique, ils sont rassemblés dans la représentation graphique des contributions aux facteurs F-J et F-2 pour les variables et les échantillons (fig. 55).

- a) l'analyse factorielle donne d'abord une bonne répartition spatiale des différentes familles pétrographiques constituant la série V_3^c , dans le plan de facteurs $F_1 - F_2$. On constate une nette confirmation de l'homogénéité lithologique des schistes du V_3^c , qui se regroupent autour de l'origine des axes.
- b) Dans ce plan de facteurs $F_1 F_2$, P_2O_5 se situe à mi-distance entre les nodules et les schistes, ce qui démontre l'enrichissement exceptionnel en phosphates des schistes. Les échantillons Y12-Y12b provenant de l'anomalie de Poilvache ont même tendance à se comporter comme de véritables nodules phosphatés. De même, l'uranium est à égale distance des schistes et des nodules.
- c) l'uranium reste à la fois lié à MR et à $P_{2,5}^{0}$, mais par rapport au cas précédemment étudié, l'adjonction des nodules a entraîné une modification des intercorrélations entre l'uranium et les éléments dans lesquels il est piégé. On constate que, dans ce cas général, la corrélation entre U et $P_{2,05}^{0}$ diminue (le coefficient de corrélation r passe de 0.72 à 0.46), par contre la liaison U-MR augmente sensiblement (r = 0.43 dans le cas précédent monte à 0.52).

d) Le Th et le K sont toujours étroitement corrélés et le doublet qu'ils forment reste opposé au triplet U-P₂0₅- MR. Leur absence dans les nodules phosphatés et dans les calcaires est manifeste.

3. Conclusions

L'application de l'analyse factorielle a permis de vérifier la plupart des résultats et des conclusions auxquels nous avions abouti dans les études précédentes. En outre, elle a permis de mieux discerner les modalités assez complexes de la distribution de l'uranium dans la série des couches de passage du Viséen-Namurien. La possibilité d'envisager, d'étudier et de comparer plusieurs cas, ainsi que la classification simultanée des variables et des échantillons dans une représentation graphique simple permettent une synthèse des résultats.

De l'étude de la série V₃c, il ressort que :

- l'uranium qui y est concentré est fixé à la fois par les phosphates et les matières organiques. Cependant, les mécanismes de cette fixation sont complexes; ils sont fonction de la lithostratigraphie.

Il semble qu'au départ, la fixation de l'uranium a été le fait des matières réductrices, y compris dans les calcaires, les phosphates en quantité encore trop faible ne jouant qu'un rôle secondaire dans le processus de fixation de l'uranium.

Lorsqu'on monte dans la série, la sédimentation phosphatée s'intensifie et les phosphates deviennent progressivement le principal agent fixateur de l'uranium au sein de la série schisteuse. Par ailleurs, dans les nodules phosphatés, le contrôle géochimique de la distribution de l'uranium est difficile à préciser. La corrélation entre U et MR est médiocre et entre U et P_2O_5 il n'existe pratiquement pas d'intercorrélation. Ce fait rend tout à fait plausible l'hypothèse d'une fixation préférentielle de l'uranium par certains faciès particulier d'apatite, plutôt que par l'ensemble des phosphates contenus dans les nodules.

L'ensemble des résultats géologiques, paléogéographiques (et même paléoclimatiques), géochimiques et radiométriques, acquis depuis le début de nos recherches, ainsi que les données générales sur la géologie des Ardennes fournies par la bibliographie nous permettent de proposer une hypothèse sur la distribution des radioéléments dans les couches de passage du Viséen-Namurien. Celle-ci intéresse principalement l'uranium qui, dans cette série, présente une importante anomalie positive d'extension régionale et d'allure stratiforme.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

I - SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS

L'étude géologique, radiométrique et géochimique des couches de passage du Viséen au Namurien (ou V₃c) et des formations qui l'encadrent nous a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- 1. Dans le bassin de Dinant, le V₃c est le siège d'une zone d'anomalies radiométriques, stratiforme et d'extension régionale repérable partout où cette série affleure. L'analyse par spectrométrie gamma en laboratoire révèle que l'uranium est le principal radioélément responsable de cette anomalie, les autres éléments radioactifs naturels, le Th et le K⁴⁰ étant pratiquement absents.
- 2. L'étude pétrographique et minéralogique des différents types lithologiques constituant la série (schistes, calcaires, nodules phosphatés) ne montre pas de différences essentielles entre les constituants des faciès uranifères et ceux des faciès peu (ou pas) uranifères. On constate cependant, que l'enrichissement en uranium coïncide avec l'enrichissement en phosphate de toute la série.
- 3. De l'ensemble des investigations géochimiques entreprises, il ressort que l'uranium est fixé à la fois par les matières réductrices et par les phosphates, le rôle fixateur de ces derniers augmentant avec le développement de la phosphatogenèse, c'est à dire de la base au sommet de la série. Les corrélations U - P₂O₅ et U - M.R. ne sont cependant pas vérifiées dans les nodules phosphatés.
- 4. Ni l'étude en lames minces, ni l'application de la diffraction des rayons X, ni l'analyse autoradiographique n'ont révélé la présence des minéraux uranifères définis : l'uranium est à l'état diffus dans l'ensemble de la série.
- 5. L'étude radiométrique des formations qui encadrent le V₃c montre que les schistes namuriens sus-jacents renferment des teneurs en radioéléments tout à fait normales (très voisines des clarkes); par contre, les calcaires V₃b X sous-jacents apparaissent comme relativement uranifères, comparés aux clarkes des roches carbonatées ou à la teneur moyenne en uranium de l'ensemble du Dinantien. Il en résulte que le processus d'enrichissement en uranium du Viséen terminal remonte au moins à cette période.

Avant de proposer pour ces anomalies du V_3 c une hypothèse génétique il est donc nécessaire de replacer l'ensemble du Viséen supérieur dans son contexte paléogéographique.

II - L'URANIUM DANS LE V₃C : HYPOTHESE GENETIQUE

1. Contexte paléogéographique

Les dépôts dinantiens de la Belgique et du Nord de la France se sont accumulés dans un bras de mer plus ou moins large, bordé au Nord par la grande île Midlands-Brabant, au Sud par les premiers chaînons nés de la phase bretonne de l'orogenèse hercynienne. Au cours du Dinantien, l'accroissement progressif de la région plissée (Cordillères internes du Haut-Fond de l'Europe Moyenne) rétrécit peu à peu le bras de mer, faisant migrer la zone de subsidence maxima vers le Nord, avec transgressions corrélatives sur l'île brabançonne (G. MORTELMANS et P. BOUR-GUIGNON, Prodrome d'une description géologique de la Belgique, 1954, p. 217-322).

Dans la région dinantaise, les lacunes localisées du V_3^a , du V_3^c et de la base du Namurien (Zone E₁) correspondraient selon PIRLET (1972) aux premières manifestations de l'onde tectogénique varisque. Cet auteur rappelle que c'est à cette époque du Viséen supérieur qu'aurait débuté l'inversion du sens des apports détritiques au profit du domaine méridional. Jusqu'à cette époque, en effet, c'est le domaine septentrional qui fournissait le matériel détritique par érosion du continent Nord Atlantique.

C'est à partir de ce changement paléogéographique marquant le début des apports détritiques en provenance du Sud que remonte le processus d'enrichissement en uranium du sommet du Viséen supérieur.

2. Origine de l'uranium

Les premières apparitions d'anomalies uranifères dans les séries du Viséen supérieur sont particulièrement importantes dans une discussion sur l'origine de cet élément.

C'est en effet à partir du V₃b qu'une tendance à l'anomalie uranifère commence à se manifester dans le bassin de Dinant. Celle-ci semble se développer progressivement lorsqu'on monte dans la série. Nous avons pu suivre ce phénomène dans la coupe d'Anhée où quelques lits argileux kaolinitiques sont interstratifiés dans les calcaires du V₃^b et V₃^c inférieur. L'origine de ces lits kaolinitiques reste très discutée. Il est possible qu'elle soit commune à celle de l'uranium. Deux hypothèses peuvent être retenues :

- l'uranium et les lits kaolinitiques pourraient provenir de l'altération en climat tropical d'un dépôt d'origine pyroclastique (tufs ou cinérites par exemple);
- l'uranium et le matériel kaolinitique pourraient être liés à l'altération continentale en climat chaud.

Dans le cas plus particulier d'un socle granitique, le clarke particulièrement élevé des roches magmatiques acides pourraient constituer un stock en uranium favorable au développement ultérieur d'anomalies en bassin sédimentaire.

a) Origine pyroclastique:

Elle est inspirée par la présence d'un tonstein repéré et décrit par H. PIRLET (1965) dans le V₃b dans les synclinoriums de Dinant et de Namur, dont l'origine est rapportée aux matériaux volcaniques. Ces derniers auraient subi une altération atmosphérique, puis les produits d'altération auraient été entraînés dans le bassin, formant ainsi de minces lits kaolinitiques; par ailleurs, on peut penser que l'uranium a été lessivé à partir de ce même processus d'altération. Nos investigations n'ont cependant pas fourni d'arguments géologiques susceptibles de militer en faveur de cette hypothèse.

b) Origine liée à une altération de socles granitiques

La prise en considération de cette origine suppose l'existence de massifs granitiques dans les régions avoisinant le milieu de sédimentation. J. CHALARD (1951) précise que du granite a pu affleurer pendant le Houiller et l'on connait des micaschistes sous le Jurassique au sondage de Ferrièreen-Bray. A partir de cette source, il est possible d'envisager le développement d'une pédogenèse génératrice de kaolinite. On peut aussi concevoir aisément le lessivage de l'uranium et son transfert en solution au cours des périodes de stabilité climatique et d'équilibre végétal (biostasie), alors que la phase résiduelle était maintenue sur le continent. Ainsi l'enrichissement progressif en uranium depuis le V_3^b jusqu'au V_3^c pourrait être li à une évacuation également progressive de l'uranium depuis le domaine d'altération. P. LEYMARIE et al. (1981) ont en effet démontré le caractère progressif d'une telle évacuation de l'uranium dans le cas d'une altération des massifs granitiques français.

A la suite des ruptures brutales et périodiques (existence de plusieurs niveaux argileux) de l'équilibre végétal (rhexistasie) dues à des modifications climatiques (ERHART, 1956) ou à des mouvements épéirogéniques positifs liés à la progression de l'onde orogénique varisque vers le Nord, la phase résiduelle est entraînée dans le bassin de sédimentation. Elle y forme de minces lits kaolinitiques. Si l'on retient l'hypothèse d'une rupture d'équilibre par les mouvements épéirogéniques, la grande extension de ces niveaux kaolinitiques sur laquelle insiste PIRLET (1965) peut s'expliquer par l'étalement du matériel d'altération dans le milieu de dépôt au cours des régressions corrélatives aux mouvements de soulèvement.

Cette origine des lits kaolinitiques est compatible avec l'analyse des distributions de radioéléments dans ces dépôts.

3. <u>L'uranium dans les termes carbonatés du V b</u>

Nos investigations ont montré que dans les lits kaolinitiques, l'uranium était lié à la fraction argileuse (bonne corrélation entre les teneurs en U et la proportion en kaolinite) à la faveur d'une préconcentration pédogénétique. Nous n'avons cependant pas pu établir le contrôle géochimique de l'uranium dans les termes des calcaires "Bleu Belge".

4. L'uranium dans le V_3c : hypothèse génétique de fixation

Les formations mixtes calcaro-schisteuses des couches de passage du Viséen au Namurien se sont déposées dans un bras de mer allant se rétrécissant et situé entre le continent paléobrabançon au Nord et la cordillère de l'Europe Moyenne au Sud, et de direction NNE-SSW.

Le caractère restreint et calme de ce milieu de sédimentation (bonne fossilisation des radiolaires), la sédimentation ralentie impliquant l'intervention du facteur temps, l'absence ou la rareté d'apports détritiques (matérialisée par les anomalies négatives en Th et K et par l'absence du quartz clastique) ont été les facteurs déterminants de l'enrichissement en uranium mais aussi de la précipitation des phosphates. Les matières organiques assez **abo**ndantes créent un environnement réducteur. C'est dans ce contexte général que la fixation de l'uranium arrivé en solution va s'opérer. Le processus de cette fixation a été le suivant :

-146-

L'uranium initialement maintenu en solution sous forme de complexe bi ou tricarbonaté où il se trouve à la valence U⁶⁺ est libéré du fait de la disparition du CO₂ dans la précipitation des carbonates. Le potentiel d'oxydo-réduction négatif (présence des matières organiques) l'amène à sa forme réduite U⁴⁺. C'est sous cette forme qu'il est fixé par les matières réductrices, principalement les matières organiques mais aussi par les phosphates qui commencent à précipiter. Cette "paragenèse" URANIUM-MATIERES ORGANIQUES-PHOSPHATES à laquelle s'ajoute de la silice d'origine chimique ou biochimique nous permet de conclure à une origine syngénétique de l'uranium dans la série V₃c.

En outre, cette association suggère que le milieu de dépôts était caractérisé par un pH compris entre 7 et 7,8 et un potentiel d'oxydo-réduction Eh négatif (voir fig. 40 d'après KRUMBEIN et GARRELS, 1952).

Lorsque la sédimentation phosphatée devient importante, le rôle fixateur des matières réductrices s'atténue et les phosphates apparaissent comme le principal piège de l'uranium. C'est ainsi que dans les schistes du sommet de la série, particulièrement riches en P₂0₅, l'uranium n'est plus lié qu'aux phosphates (voir analyse factorielle).

A la fin du V_3^c , une lacune de sédimentation s'installe (lacune de la zone E_1^c du Namurien). Celle-ci a pour effet de favoriser la fixation de tout l'uranium disponible dans les eaux interstitielles, au sein d'une série V_3^c extrêmement condensée. Dans la partie Est du synclinorium où cette condensation est parti-culièrement forte, il n'y aura qu'un seul niveau uranifère caractérisé par des teneurs très élevées. Dans le bassin d'Anhée, où les dépôts sont beaucoup plus épais, on remarque par contre une certaine dilution du contenu uranifère.

Au Namurien, lorsqu'une sédimentation franchement détritique s'installe, tout l'uranium en solution est déjà fixé et les teneurs **dens** cette série restent normales, c'est-à-dire voisines des valeurs de clarke pour ce type de sédiment.

III - INTERET DE CETTE ETUDE

Ce travail a donc permis la mise en évidence d'une anomalie uranifère stratiforme et d'extension régionale dans le V₃c du bassin de Dinant et établit le contrôle géochimique de celle-ci. Certes, cette concentration uranifère ne présente aucun intérêt dans le contexte économique actuel, compte tenu de ses teneurs trop faibles et de l'épaisseur réduite de la série minéralisée. Cependant, elle peut constituer un bon repère radiostratigraphique utile pour tout travail de recherche géologique dans lecdomaine qui la renferme. Ce travail constitue également une contribution à l'étude des mécanismes de concentration de l'uranium.

IV - PERSPECTIVES OUVERTES PAR CETTE ETUDE

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pu démontrer de manière explicite l'origine de l'uranium rencontré dans certains niveaux du Viséen supérieur. Si la présence de l'uranium dans les calcaires du V₃c a pu être mise en relation avec les matières réductrices et, dans une moindre part, avec les phosphates, dans ceux du V₃b ou "Bleu Belge", le contrôle géochimique de l'uranium reste à déterminer.De même la présence "accidentelle" des lits kaolinitiques au sein de la série calcaire du Viséen supérieur n'a été expliquée que sur la base d'hypothèses.

Nous poursuivons, en ce moment, nos recherches dans le but d'apporter des éléments de réponse à tous les problèmes soulevés par ce travail.

Un autre champ d'investigations est représenté par les nodules phosphatés enrobés dans la série des schistes V_3^c . Les fortes similitudes que ces nodules présentent avec ceux de la Montagne Noire et des Pyrénées (France) et ceux de la Montagne du Harz (R.F.A.) tant du point de vue des faciès que de leur contenu en radiolaires méritent un examen plus approfondi. Ces similitudes suggèrent l'existence de conditions paléogéographiques et sédimentologiques particulières favorables à la formation de tels nodules.

Enfin le problème de la distribution de l'uranium dans ces mêmes nodules reste à préciser.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ALVINERIE J. et VIGNEAUX (1965).- Radioactivité naturelle de certains faciès calcaires oligocènes aquitains. Bull. Soc. Géol. de France. VII, pp. 660-664.
- BALEINE O., CHARLET J.M., DUPUIS Ch., et MEYS H. (1976).- Dosage par spectrométrie gamma des radioéléments naturels, application à l'étude de quelques formations du bassin de Mons. Ann. Scient. Départ. Mines-Géologie, pp. 9-29.
- BATURIN G.N., et MERKULOVA K.I. (1972).- Radiometric evidence for recent formation of phosphatic nodules in marine Shelf sediments. Marine Geology. Vol. 13 pp. M 37-M 41
- BATURIN G.N. et BEZRUKOV P.L. (1979).- Phosphorites on the Sea Floor and their origin Marine Geology, Vol. 31 pp. 317-332.
- BELL.R.T. (1978).- Uranium in black shales. A review. in : M.D. KIMBERLEY Editor. Vol. 3 pp. 307-322.
- BERZINA I.G. et KARPOVA M.I. (1976).- Uranium distribution in nodular platform phosphorites.Litologiya i poleznye Iskopaemye. n° 2, pp. 90-98, March-April 1976
- BOUCKAERT J. (1963).- Description d'une coupe à travers le bassin houiller d'Assesse. Bull. Soc. belge Géol. Pal. Hydr. t LXXI, fasc. 3, pp. 497-502
- BOUCKAERT J. et HIGGINS A.C. (1963).- La base du Namurien dans le bassin de Dinant. Bull. Soc. Belge Geol. LXXII. fasc. 2. pp. 106-120
- BOUCKAERT J. (1967).- Namurian transgression i. Belgium. Ann. Soc. Geol. Pologne, 37 pp. 145-150.
- BOUCKAERT J., DELMER A. et OVERLAU P. (1961).- Stratigraphie du Viséen moyen superieur et du Namurien inférieur de la région de Basècles-Blaton.Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain. pp. 239-255.
- BOUROZ A. (1963).- Manifestation de la phase sudète del'orogénèse hercynienne dans le bassin houiller du Nord de la France. C.R. Ac. Sc. Paris t.256 pp. 4249-4251.
- BREGER I.A. et DEUL M. (1956).- The organic geochemistry of uranium. U.S. Geol. Surv. Prof. PAPER. n° 300, pp. 505-510.
- BROWN J.H. et KELLER W.D. (1952).- Uranium in the clay of a black radioactive shale. Science, t. 116 pp. 632-633.
- BURNETT W. (1977).- Geochemestry and origin of phosphorite deposits from of Peru and Chile.Geol. Soc. of Am. sull. Vol. 88 pp. 813-823.
- CAMERON E. M. (1980).- Geochimical exploration for uranium in northern lakes. In Geochem. Explor., 13 : pp. 221-250.
- CAYEUX L. (1939).- Les phosphates de chaux sédimentaires de France dans les gîtes minéraux de la France.t.1, Paris Imprimerie Nationale.
- CHAABANI F. (1978).- Les phosphorites de la coupe-type de FOUM SELJA (Tunisie). Une série sédimentaire séquentielle à évaporites de paléogène. Thèse de 3° cycle Univ. Louis Pasteur. Strasbourg.
- CHALARD. J. (1946).- Application du compteur Geiger-Müller à la stratigraphie dans le bassin houiller du Nord de la France. C.R. Ac. Sc. Paris t. 216 pp. 270-271.

- CHALARD J. (1951).-Tonsteins du bassin houiller du Nord de la France, C.R. 8° Congr. Strat. et Géot. Varbonifère, Heerlen. pp. 73-78.
- CHARLES G. (1953).- Cycle géochimique du phosphore et formation dans l'écorce terrestre d'amas et minéraux phosphatés. Cong. géol. int. C.R. XIX[®] Session, Section XI, Alger, pp 77-90.
- CHARLET J.M., DUPUIS Ch, QUINIF Y et DRUMEL B. (1981).- Prospection autoportée du Paléozoigue belge.Rapport final pp. 135-180.
- CHARLET J.M. (1964).- La spectrométrie gamma et son utilisation dans l'étude des minéraux radioactifs. Bull. Soc. Belge de Géol. t. 73 pp. 7-32.
- CLARK S.P. (1966).- Tableau des clarkes, extrait de : Gamma-ray surveys in uranium exploration. Atomic Energy Agency Vienna 1979 Technical reports n° 186.
- CONIL R. GROESSENS E. et PIRLET H. (1976). Nouvelle Charte stratigraphique du Dinantien type de Belgique. Ann. Soc. Géol. du Nord t. XCVI pp. 363-371.
- CONIL R. PIRLET H. et LYS M. (1967). Echelle biostratigraphique du Dinantien de la Belgique. Prof. paper n° 13 p. 56.
- COPPENS R. et SALEH BASHIR (1975).- Etude préliminaire de la radioactivité des phosphates d'Al hasa (Jordanie). C.R. Ac. Sc. Paris t. 280 Série D, pp. 807-808.
- COPPENS R. (1953).- Sur la radioactivité des ampélites.C.R. Ac. Sc. Parist. 236 pp.600-601.
- COPPENS R., DURAND G., JURAIN G. (1965). Equilibre et déséquilibre radioactifs dans les minéraux et les roches. Sciences de la Terre, NANCY, 10, pp. 105-131.
- DAVEY P.T. et SCOTT T.R. (1956).- Adsorption of uranium on clay minerals Nature.Vol. 178 n° 4543 p. 1195, Novembre 1956.
- DE BELINKO G. (1969).- Conditions océan**ogra**phiques de la génèse des phosphates sédimentaires marins. C.R. Acad. Sc. Paris T. 269 p. 935.
- DEFFEYES KK et Mc GREGOR I. (1980).- Comment estimer les ressources mondiales en uranium ' Revue POUR LA SCIENCE n° 29 pp. 72-83.
- DEGARDIN J.M. (1977).- Contribution à l'étude des Silurien de la région de Benasque (Pyrénnées Centrales espagnoles). Thèse 3° cycle, Lille.
- DEGENS E.T., KHOO F. and MICHAELIS W. (1977). Uranium anomaly in Black Sea sediments. Nature, 269, pp. 566-569.
- DELMER A. et ANCION Ch. (1954). Le Namurien, in Prodrome d'une description géologique de la Belgique pp. 323-352.
- DEMANET F. (1938).- La faune des couches de passage du Dinantien au Namurien dans le synclinorium de Dinant. Mém. du Musée Royal d'Histoire Naturelle de Belgique n° 84
- DUMON P. (1962).- La géologie des carrières. Extrait de la Revue mensuelle des Arts et Techniques des roches de qualité "Le MAUSOLEE".
- DUNOYER DE SEGONZAG G. (1969). Les minéraux argileux dans la diagénèse, passage au métamorphisme. Mém. serv. carte géol. Als. Lorr., 29, 320 p.

ERHART H. (1956).- La genèse des sols en tant que phénomène géologique Masson Ed. Paris.

FIX C.E. (1958).- Selected annotated bibligraphy of the geology and occurence of uranium bearing marine black shales in U.S.A. Geol. Surv. Bull. 1059-F pp. 263-325.

FOURMARIER P. (1954). - Prodrome d'une description géologique de la Belgique.

- FREDERICKSON A.F. (1948).- Some mechanism for the fixation of uranium in certain sediments Science Vol. 108 p. 2799.
- GAUTHIER M. (1961).- Contribution à la géochimie de l'uranium des roches sédimentaires et en particulier des schistes carbonifères. Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lorraine t. 14 fasc. 4 pp. 179-208.
- GOLDSZTAUB S. et WEY R. (1955).- Absorption des ions uranyles par les argiles. Bull. Soc. Franç. Min. Crist. t. 78 pp. 242-248.
- GROESSENS E. (1974).- Distribution des conodontes dans le Dinantien de la Belgique. Int. Sump. Belg. Micropal. Limits. Serv. Geol. Belg. publ. n° 17.
- GULDBRANDSEN R.A. (1970).- Relation of carbon dioxide content of apatite of the phosphoria formation to regional facies. U.S. Geol. Surv. Prof. PAPER 700-B pp. B9-B13
- HASSAN M. et HOSSIN A. (1975).- Contribution à l'étude des comportements du thorium et potassium dans les roches sédimentaires. C.R. Ac. Sc. Paris t. 280 pp. 533-535
- HASSAN M. et KHALED A. (1976).- La répartition de l'uranium dans les phosphates du Sénonien dans le Nord-Ouest syrien. C.R. Ac. Sc. Paris t. 282 Série D pp. 811-813.
- HERBOSCH A (1974).- Facteurs contrôlant la distribution des éléments dans les shales uranifères du bassin permien de Lodève (Herault France). in : Int. Atomic Energy Agency Vienna SM 183/3 pp. 359-380.
- HERBOSCH A. DE WITTE S.M. et PREAT A. (1979). Recherches sur les indices de minéralisations uranifères dans la région de Visé . Serv. Geol. Belgique. Prof. PAPER n° 162
- HIGGINS A.C. (1975).- Conodont zonation of the late Visean-early wesphalian strata of the south and Central pennines of northern England. bull. of the Geol. Surv. of Great Britain n° 53 p. 90.
- HIGGINS A.C. and BOUCKAERT J. (1968).- Conodont stratigraphy and paleontology of the Namurian. Mém. Expl. Cartes Geol. et Min. Belgique, n° 10, 51 p.
- HOLTZAPFFEL Th. (1981).- Minéralogie des argiles dans les roches anté-crétacé superieur d'Othrys (Grèce) D.E.A. Univ. de Lille I. 52 p.
- HOSTETLER P.B. and GARRELS R.M. (1962).- Transportation and precipitation of uranium and vanadium at low temperatures, with special reference to sandstone - type uranium deposits. Econ. Geol.57. pp. 137-167.
- JAMES D., VINE J.D. et TOURTELOT E.B. (1970).- Geochemistry of black shales deposits. A summuury report. tcon. Geol. Vol. 65 pp. 253-272.
- JEDWAB J. (1959).- Présence des grès uranifères à Argenteau (province de Liège) Bull. Soc. Belge de Geol. 68 pp. 319-323.

- JURAIN G. (1956).- Présence d'uranium dans les nodules phosphatés du Lias moyen des Vosges C.R. Ac. Sc. Paris ti 242. pp. 1748-1750.
- KRUMBEIN W.C. and GARRELS R.M. (1952). Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation - reduction potentials. The Journ. of geol. Vol. 60 pp. 1-33.
- LANDAIS P. et CONNAN J. (1980).- Relation uranium-matière organique dans deux bassins permiens français : Lodève (Herault) et Celery-Bourbon-l'Archambault (Allier) in : Bull. Cent. Rech. Expl. Prod. ELF-Aquitaine Vol. 4 n° 2 pp;709-757
- LECOMTE P. (1975).- Géochimie de la surface du Cambrien et de l'Eodevonien dans les bassins de la Lomme et de la Lesse superieures. Doct. Univ. Catholique de Louvain Belgique.
- LEGRAND R. (1957).- Brèches radioactives aux environs de Visée. Bull. Soc. Belge de Geol. t. 66, fasc. 2, pp. 211-217.
- LEYMARIE P., ROYER J.J. et ISNARD P. (1981).- La mobilité de l'uranium lors de l'altération des granites. C.R. Sc. Paris, t. 292 pp. 199-209.
- LUCAS J. PREVOST L. et LAMBOY M. (1978).- Les phosphorites de la marge nord de l'Espagne, chimie, minéralogie et genèse. Océanol. Acta, 1, 1, pp. 55-72
- MARTIN J.A. (1962).- Fixation et transport de l'uranium par les substances humiques. Thèse Sc. Nat. Univ. Nancy I.
- Mc CLELLAN G.H. et LEHR J.R. (1969). Crystal chemical investigation of natural apatites. Ann. Mineral. 54, pp. 1374-1391.
- Mc KELVEY V.E. (1973). Abondance and distribution of phosphorus in the lithosphere. In Environmental phosphorus Handbook, pp. 13-31.
- MICHOT P. (1980).- Belgique : Introduction à la géologie générale Livret-guide. 26° Congrès Géologique International, Paris 1980
- MORTELMANS G. et BOURGUIGNON (1954). Le Dinantien in, Prodrome d'une description géologique de la Belgique. pp. 217-322.
- MUCHEMBLE G. (1943).- Sur la radioactivité des roches marines du terrain houiller du Nord de la France. C.R. Ac. Sc. Paris. t. 216 pp. 270-271.
- MUCHEMBLE G. (1952).- Observation sur les eaux souterraines radioactives du Nord de la France et radioactivité des rochesencaissantes. Ann. Inst. Hydrol. Climat. t. XXIII.
- NDZIBA M. (1980).- Etude géologique et radiométrique de la région de Bioul (province de Namur) Belgique. D.E.A. Univ. Lille 1.54 p
- O'BRIEN G.W. and VEEH H.H. (1980).- Holocene phosphorite on the East Australian continental margin Nature . Vol. 288.

- PAPROTH. E. et ZIMMERLE W. (1980). Stratigraphic position, petrography, and depositional environment of phosphorites from the Federal republic of Germany in Mededelingen ryks geologische dienst., V@1. 32, 1-4, pp. 81-95.
- PIRLET H. (1972).- La "Grande Brèche" viséenne est un olisthostrom. Son rôle dans la constitution du geosynclinal varisque en Belgique. Ann. Soc. géol. Belgique, t. 95, fasc. 1, pp. 53-134.
- PIRLET H. (1965).- Présence d'un tonstein dans le Viséen supérieur des synclinoriums de Namur et de Dinant. Ann. Soc. Géol. Belgique, t. 89, pp. B27-B32.
- QUINIF Y. CHARLET J.M. et DUPUIS Ch. (à paraitre dans le prochain n° du Bull. Soc. Géol. de la Belgique).- Géochimie des radioéléments : U-Th-K₂O dans les roches détritiques : une nouvelle méthode d'interprétation.
- RAGUIN E. (1961).- Les phosphates in Géologie des Gîtes minéraux, pp. 227-250. Masson Ed., Paris.
- ROUBAULT M. (1965).- Les minerais uranifères français, Presse Univ. de France, t. III, vol. 1 et 2.
- ROUTHIER P. (1963).- Les gisements métallifères. Masson Ed., Paris, T. II.
- ROUZAUD J.N. (1979).- Etude structurale des matières carbonées associées à des minéralisations uranifères. Thèse Univ. d'Orléans.
- SCHEERE J. et VAN TASSEL R. (1969).- Phosphorites du passage Viséen-Namurien à Blaton, Province du Hainaut et à Warnant, Province de NamurBull. Soc. Belge de Géol., t. 77, pp. 245-262.
- SERRA O. (1979).- Mesure de la radioactivité gamma naturelle, in Diagraphies différées, base de l'interprétation. wull. Cent. Rech. Expl.-Prod., Elf-Aquitaine, T.I., p. 123-143.
- SLANSKY M. (1980) .- Géologie des phosphates sédimentaires. Mém. B.R.G.M., n° 114.
- SWANSON V.E. (1960).- Oil yield and uranium content of black shales. Geol. Surv. Prof. Paper 356-A, pp. 1-44.
- SWANSON V.E. (1961).- Geology and geochemistry of uranium in marine black shales, a review. U.S.Geol. Surv. Prof. paper 356-C, pp. 61-111.
- VANDAEL et CHANDELLE (1953).- Chimie analytique appliquée à la métallurgie. 3°éd. de HUYBRECHTS, Masson Ed., raris 468 p.
- VAN LECKWIJCK W.P. (1964).- Le Namurien en Belgique et dans les régions limitrophes. Mém. Académie Royale de Belgique, t. XVI, fasc. 2.
- WATERLOT G. (1945).- L'évolution de l'Ardenne au cours des diverses phases des plissements calédoniens et hercvniens. Bull. Soc. Géol. France, 5è série, t. 15.

PLANCHES

PHOTOGRAPHIQUES

PLANCHE I

Photos A, B, C et D : Autoradiographie d'un nodule phosphaté (Echant. HW-AN₁) Détecteur : film KODAK LR-115 Type 2 temps d'exposition : 6 semaines. On observe une assez forte densité des traces des particules o((photos A,B,C.). La photo D prise à la périphérie du même nodule montre une zone moins radioactive.

Photo E : Autoradiographie d'un nodule phosphaté (Echant. WPP-5) Détecteur : film KODAK CN-85 temps d'exposition : 6 semaines.

On constate une dispersion assez homogène des traces des particules γ .



PLANCHE II

Photos 1 et 2 : Schistes de la série V₃C vus à l'affleurement

- Photo 3 : Schistes V₃C vus au microscope (LN). On remarquera la finesse du grain.
- Photo 4 : Schistes namurien (LN). On remarquera la différence lithologique avec les schistes V₃C. A : grains de quartz clastique.
 - B : lamines schisteuses
- Photo 5 : Calcaire fin du V₃c. On remarque la présence de matières organiques distribuées en un petit lit parallèle à la microstratification (LN).



PLANCHE III

Photo I : Nodules phosphatés

Photo 2 : Nodules phosphatés vus en section

Photos 3 à 9 : Lames minces taillées dans différents nodules: certains présentent un nucléus différencié (Ph. 3,6,9). D'autres ne temoignent d'aucune différenciation. On remarquera la relation entre les nodules et leur encaissant (Ph. 3,4,7 et 8).

Photo 10 : (LN) Différents faciès phosphatés :

- A : Plage brune de collophanite
- B : Gangue phosphatée cryptocristalline
- C : Phosphate microcristallin (Fluorapatite).

Photo 11 : Relation entre deux nodules phosphatés (NP) riches en matières organiques et leur encaissant (SE).

Photo 12 : (LN) Nucléus à ovules de collophanite (A) (B) = matière phosphatée
























PLANCHE IV

Photos 1 à 5 (LN) : Différents faciès phosphatés :

- photo 1 : olithes de phosphate dans un nodule.
- photo 2 : phosphate en grains (A). Présence d'une straticule phosphatée (B) parallèles aux lamines schisteuses(C).

photo 3 : Nodule phosphaté (A) collophanite en couches concentriques - (B) fluorapatite microcristalline-(C) sphérolite de phosphate - (D) gangue phosphatée

photo 4 : Faciès phosphatés très variés

۰ *

photos 5 à 7 : Radiolaires de différentes formes fossilisés par la matière organique (ph.7) ou par le phosphate (ph.5)













PLANCHE Y

Photo 1 (LN) La précipitation de la fluoapatite microcristalline semble avoir été orientée par la structure du radiolaire.

Photo 2 à 6 : (LN) Radiolaires à tests bien conservés, fossilisés par le phosphate (ph.2 et 6) par la matière organique (ph.5).



PLANCHE VI

Photos 1 à 4 : (LN) Tissus cellulaires de débris de plantes (genre Archaeocalamites fossilisés dans

un nodule et épigénisés en phosphate.

photos 1 et 3 : Coupe transversale du bois secondaire.

photo 4 : Coupe radiale d'un axe. On distingue les fils de ponctuations aréolées et unisériées sur les parois des trachéides (voir flèche).

Photo 5 : Goniatite à l'intérieur d'un nodule phosphaté

Photo 6 : Conodonte à l'intérieur d'un phosphate en grains.



PLANCHE VII :

Microfaune de conodontes : grossissement : X 50

Photos 1, 2 et 3 : Gnathodus girti girti

Photos 4 et 5 : Paragnathodus nodosus

Photos 6 et 7 : Gnathodus homopunctus

Photo 8 : Paragnathodus mononodosus

Photos 9, 10 et 11 : Paragnathodus commutatus

Photo 12 : Gnathodus bilineatus.



ANNEXE

Pour ne pas alourdir le texte, la méthode de diffraction des rayons X et les méthodes d'analyses chimiques ont été développées en annexe.

A₁ - LA DIFFRACTION DES RAYONS X

1. Introduction

L'examen microscopique classique étant rendu difficile par les faibles dimensions et la cristallinité peu apparente des constituants et/ou par la pigmentation des échantillons étudiés, l'utilisation de la diffraction des rayons X s'est avérée nécessaire.

Deux techniques ont été utilisées en fonction des résultats recherchés :

- la technique dite des "pâtes orientées" pour l'étude minéralogique de la fraction argileuse (inférieure à 2 um);
- la technique des "poudres désorientées" pour l'étude minéralogique de la roche totale.

2. Principe et appareillage

Le principe est celui de la diffraction suivant les plans réticulaires d'un faisceau des rayons X qui obéit à la loi de BRAGG :

 Υ = 2d sin θ

avec γ = longueur d'onde de la source
d = espace inter-réticulaire du réseau des plans cristallins
θ = angle d'incidence du faisceau sur les plans cristallins

Les enregistrements ont été faits sur un diffractomètre Kristalloflex SIEMENS à anticathode de Cu avec les constantes suivantes : - un filtre Ni

- un générateur de tension : 20 KV, 16 mA

- radiation utilisée : Cuk θ = 1,540 Å

- une baie de contrôle
- un enregistreur

Les conditions expériementales ont été choisies de la manière suivante :

- vitesse angulaire du goniomètre = 2°/mn

- déroulement du papier : 1 cm/mn
- sensibilité choisie selon l'intensité du pic maximum (pic 001 à 10 A de l'illite).

3. Technique de laboratoire en vue de la diffraction des rayons X

3.1. La technique des pâtes orientées

Cette technique permet l'étude minéralogique de la fraction argileuse inférieure à 2 μ m.

A partir d'échantillons broyés et préalablement analysés, du point de vue de leur contenu en radioéléments, les principales opérations à effectuer sont les suivantes :

- mise en suspension dans l'eau du matériel à étudier;
- décarbonatation par Hcl N/5;
- centrifugation à 2500 tours par minute pendant trois minutes, jusqu'à défloculation du mélange;
- homogénéisation du mélange par mixage au micro-homogénéisateur pendant 10 mn environ;
- après lh 40 mn de décantation, on prélève la fraction inférieure à 2µm (les 2 cm supérieurs);
- centrifugation de la fraction ainsi prélevée à 3500 tours/mn pendant 40 mn;
- le culot obtenu est ensuite étalé sur une lame porte-échantillon, rainurée en son centre. Cet étalement est fait de façon homogène sans relief et toujours dans le même sens afin d'orienter les particules.

Pour la détermination la plus sure possible des minéraux argileux, en plus de l'analyse du mélange naturel des analyses complémentaires ont été aussi effectuées sur des dépôts orientés après des traitements particuliers (chauffage à 490°, essai de gonflement à l'éthylène glycol). Tous nos échantillons de schistes et de phosphorites ont été étudiés suivant cette méthode

3.2. La technique des poudres désorientées

Elle a été utilisée surtout dans le cas particulier de nodules phosphatés et des faciès carbonatés, dans le but de réaliser une étude minéralogique plus complète à partir de la roche totale.

Elle consiste en la confection des dépôts désorientés sur une lame porte-échantillon avec la poudre de la roche totale obtenue après broyage (granulométrie tamis de 65 meshs).

4. Dépouillement des diagrammes

La lecture des diagrammes obtenus se fait de la droite vers la gauche, des petits aux grands angles. L'enregistrement est fait en degrés 2 θ (Cu Kd), un "top" étant donné tous les degrés de 1 θ . Le premier "top" correspond à 3° 2 θ .

4.1. Analyse qualitative

Elle consiste à repérer la raie principale (ordre 001) et les raies harmoniques éventuelles des minéraux contenus dans le mélange naturel étudié.

L'analyse de ce mélange à la suite des différents traitements permet de différencier les minéraux dont les raies sont proches ou superposées.

a) Identification des minéraux argileux

- <u>l'illite</u> : la réflexion principale d OOI (AO Å) et ses deux harmoniques d OO2 (5 Å) et d OO3 (3,33 Å) invariables aux différents traitements permettent de l'identifier très facilement.
- <u>la chlorite</u> : les quatre réflexions (14 Å, 7Å, 4,72 Å, 3,55 Å)permettent la détermination de ce minéral.
- <u>la kaolinite</u> : sa discrimination a été envisagée au vu de deux réflexions plus ou moins bien développées (7.1 Å et 3,56 Å) superposées ou non aux raies d'ordre pair de la chlorite. Le chauffage et surtout le traitement par l'hydrazine-monohydrate permet de la séparer de la chlorite.

b) Identification des minéraux argileux

Ils ont été identifiés par analyse du mélange naturel de la fraction inférieure à 2 um ou à partir des poudres désorientées de la roche totale. Les principaux minéraux reconnus dans la série qui nous intéresse sont:

- le quartz, très abondant et caractérisé par les réflexions 4,26 Å et 3.34 Å
- l'apatite, principalement sa variété fluorapatite de formule Ca $_{10}$ (PO₄)₆ F₂ a été déterminée à partir des réflexions 2,785 Å, 2,766 Å 2,69 Å.

la calcite caractérisée par les réflexions 3,04 Å, 2,29 Å et 2,10 Å.
Les autres minéraux non argileux reconnus sont les feldspaths et les amphiboles (?) dont la nature ne peut être précisée.

4.2. Analyse quantitative

Elle consiste à exprimer en pourcentage les quantités relatives des différents minéraux argileux contenus dans le mélange étudié. Pour cela, on somme les hauteurs, mesurées par rapport au bruit de fond stabilisé, des pics principaux (ordre 001) des différents minéraux argileux et on ramène le total à 100 %. Les estimations sont données de 5 % en 5 %.

4.3. Cristallinité de l'illite

Elle correspond à la largeur exprimée en $1/10^{\circ}$ 2 θ (Cu Kx), de la réflexion à 10 Å de l'illite, mesurée à demi-hauteur du pic, au-dessus du bruit de fond stabilisé sur l'essai glycolé (fig. 2).



Fig. 2 .- Mesure de cristallinité de l'illite d'après DUNOYER DE SEGONZAG (1969)

a = cristallinité de l'illite (°2 θ)

A₂ - <u>LES ANALYSES CHIMIQUES</u>

1. Dosage des matières réductrices

1.1. Principe de la méthode

Les matières réductrices (matières organiques, sulfures ...) sont oxydées à chaud par le dichromate de potassium ($K_2 Cr_2 O_7$) en excès, et ce, en milieu sulfurique. L'excès de $K_2 Cr_2 O_7$ est titré en retour par une solution de Fe⁺⁺ (sel de Mohr).

1.2. Dosage des échantillons

L'échantillon finement broyé (tamis de 65 mesh), pesé exactement est introduit dans un ballon à col rodé de 500 ml. On ajoute successivement dans le réacteur 50 ml de $K_2 \operatorname{Cr}_2 \operatorname{O}_7 \frac{N}{5}$, 20 ml $\operatorname{H}_2 \operatorname{SO}_4$ concentré très prudemment, on agite, puis on fait bouillir à reflux durant 30 minutes. On laisse refroidir quelques minutes, puis on ajoute au mélange 200 ml d'eau distillée, 10 ml $\operatorname{H}_3\operatorname{PO}_4$ concentré, puis 1 ml d'indicateur coloré (solution de Diphénylamine sulfonate de Na). On titre à froid par la solution de sel de Mohr. On détermine la quantité de $\operatorname{K}_2\operatorname{Cr}_2\operatorname{O}_7$ réduite en % pondéral de l'échantillon.

2. Analyse des phosphates

Les phosphates ont été analysés de deux manières, en fonction de la richesse en P_2O_5 des échantillons. Les phosphates, en raison de leur forte concentration en P_2O_5 ont été analysés par la méthode titrimétrique, après formation d'un précipité de phosphomolybdate. Pour les roches à faible teneur, les schistes et les calcaires, lq teneur en P_2O_5 a plutôt été déterminée par colorimétrie, après formation d'un complexe mobybdovanadophosphorique.

2.1. La méthode titrimétrique

a) Formation du précipité de phosphomolybdate

Mode opératoire

Une quantité exactement pesée de l'échantillon broyée est attaquée par HCl fumant (30 ml) à chaud. On ajoute successivement une demi-pastille de chlorate pour détruire les matières organiques, puis 10 ml de Hcl 5 N et on chauffe pour dissoudre les sels basiques. On laisse refroidir quelques instants puis on ajoute 25 ml d'eau distillée et 25 ml de HNO₃ 14 N. On chauffe à ébullition et on maintient celle-ci jusqu'à disparition des vapeurs rutilantes; il faut environ une 1/2 heure pour atteindre ce résultat. Quand le chlore est expulsé, il importe de ne plus évaporer à On dilue le produit de l'attaque par 50 ml d'eau et on le transvase dans un ballon jaugé de 250 ml. Après refroidissement du liquide acide, on complète au volume et on rend le tout homogène par agitation. On prélève 100 ml de la solution (de 250 ml) qu'on introduit dans un vase de 400 cm3. On neutralise par l'ammoniaque; dès que la basification est obtenue, on cesse l'addition de l'ammoniaque et on fait disparaitre le colloïde ferrique au moyen de quelques gouttes de HNO₃ 6 N. On ajoute encore 30 ml de HNO₃ 6 N et 10 grammes de nitrate ammonique solide. On chauffe jusqu'à 90°, puis on ajoute 50 ml de liqueur molybdique bien limpide (la filtrer au besoin) en ayant soin de ne pas la laisser couler le long des parois du vase. La température du mélange ne doit guère dépasser les 75°; on agite et on abandonne au refroidissement. En quelques instants, le précipité jaune, bien cristallin, qui se forme est déposé.

Après refroidissement complet, ce qui demande au moins une heure, on le recueille sur un filtre de 9 cm. Le mode opératoire à partir de ce moment varie suivant l'usage qu'on peut faire du précipité.

b) Dosage titrimétrique

Le précipité de phosphomolybdate est recueilli sur un filtre de 9 à 11 cm. On le lave au moyen d'une solution de nitrate potassique à 0.5 % (celle-ci réduit la solubilité du milieu). Après une douzaine de lavages (et même plus) on essaie au tournesol la réaction du liquide qui passe; dès que le pH n'est plus acide, on lave deux fois à l'eau distillée, puis on met le filtre et son contenu dans le vase où la précipitation s'est faite et on y ajoute 30 ml préalablement neutralisé en présence de phénolphtaléine comme indicateur.

Avec une baguette de verre, on délaie le précipité, puis on le dissout <u>complétement</u> dans 50 ml mesurée à la pipette d'une solution d'hydrate sodique titrée. On ajoute 3 gouttes de phénolphtaléine puis on titre l'excès d'hydrate sodique au moyen d'une solution de HNO₃ qu'on laisse couler d'une burette. Le terme de la réaction n'est pas très net; lorsque la teinte du liquide est devenue très pâle, on ajoute à nouveau 3 ou 4 gouttes d'indicateur. La coloration redevient un peu plus vive et on peut alors terminer avec plus de précision; on continue l'addition de HNO₃ aussi longtemps qu'on voit la teinte de l'indicateur se modifier. On rince avec de l'eau distillée les parois du vase un peu avant la fin du titrage.

Connaissant le poids de l'échantillon, le titre et la quantité de la solution d'ammoniaque ayant servi à titrer la solution de phosphate et sachant par ailleurs que : 1 ml de NaOH à 0,5 N correspond à 0,001543 g P_2O_5 , on détermine la teneur en P_2O_5 en % pondéral de l'échantillon.

-6-

2.2. La méthode colorimétrique (VANDAEL et CHANDELLE 1953):

C'est une méthode précise (0,1 %) qui permet d'atteindre les traces. Elle utilise un complexe jaune de phosphovanadomolybdate formé en milieu acide. La coloration de ce complexe se développe assez rapidement et est stable plusieurs heures. La température n'a pas d'influence sur la coloration.

La silice donne un complexe silicomolybdate jaune mais en milieu fort acide (ph \leq 1), il n'y a pas d'interférence.

a) Attaque par Hcl/HNO2

A un gramme de roche broyée, on ajoute 30 ml de HCl (5n) et on chauffe pour dissoudre les sels basiques. On ajoute ensuite 25 ml de H_2^0 et 25 ml de HNO₃ (14 N). On chauffe jusqu'à disparition des vapeurs rutilantes.

Le résidu obtenu est transvasé dans un matras de 250 ml et on complète au trait avec de l'eau.

b) Dosage colorimétrique

Les réactifs utilisés

- molybdate ammonium $(NH_4)_6 Mo_7 O_{24} \cdot 4H_2 O_{24}$ solution à 35,5 gr./1
- vanadate ammonium NH, VO3
- solution $HC10_{4}$ (8 M)
- solution standard P_2O_5 obtenue à partir de KH_2PO_4 préalablement séché 2 heures à 100°C (KH_2PO_4 contient 52,17 % de P_2O_5).

. L'échelle d'étalonnage pour des teneurs 87 P205

Elle a été réalisée à partir d'une solution type de KH_2PO_4 (0,5000g (P_2O_5) / 1000 ml.

Dans des matras de 100 ml, on a prélevé :

-	2	ml	solution	standard	:	0,5	%	P,0-	
---	---	----	----------	----------	---	-----	---	------	--

-	4 ml	n	"	1	%	"
-	6 ml	"	**	1,5	%	"
-	8 ml	11	"	2	%	**
-	10 m1	Ħ	**	2,5	%	11
-	12 ml	"	**	3	%	"

-7-



Construction of the second	and the second sec				
	Blanc (ml)	Standard (ml)	Echantillon (ml)		
	50 H ₂ 0	Quantités obtenues par l'échelle	50 des 250 résultant de l'attaque		
HNO ₃ (6N)	10	10	5		
Vanadate	10	10	10		
Molybdate	10	10	10		

Pour le dosage, les réactifs ont été ajoutés dans l'ordre ci-dessous :

On complète au trait avec H_2^0 et on laisse la coloration se développer pendant 30 minutes. Les résultats sont obtenus par lecture à 460 nm, sur un appareil photocolorimètre de SPEKKER.

. La courbe d'étalonnage

Elle est obtenue en portant sur un graphique la densité optique (D.0.) en fonction du pourcentage P_2O_5 (solution standard). C'est une droite (fig. 2) d'équation :

D.O.	=	а	х	$(P_{2}0_{5})$	а	=	COE	eff	icient	ang	gulaire	
				2 -			de	la	droite	d	'étalonnage	•

En divisant la densité optique de chaque échantillon analysé par le coefficient angulaire a, on obtient directement la concentration en P_2O_5 .

3. Dosage des carbonates : calcimétrie

3.1. Principe

On décompose dans un appareil approprié l'échantillon à analyser par un excès de HCl. L'anhydride carbonique produit se dégage et est mesuré. La connaissance de son volume permet d'en déterminer le poids.

3.2. Appareil

L'appareil utilisé est un calcimètre. Ceclui-ci est constitué essentiellement de (fig. 3)

- une burette B graduée d'une capacité de 100cm3,
- un flacon D où se fait la réaction,
- une ampoule C aussi large que la burette,
- un tube de niveau A
- des vaves.

Tous ces dispositifs sont reliés par des tuyaux de caoutchouc.



Fig : 3-

3.3. calcul des teneurs

On se base, pour le calcul, sur ce fait que l cm3 d'anhydride carbonique, pèse dans les donditions moyennes environ 0,00185 gr et correspond à 0,00420 gr de carbonate calcique.

On pose :
$$\frac{1 \text{ cm} 3 \text{ CO}_2}{0,004208 \text{ gr. CaCO}_3} = \frac{V}{x}$$

x donne le poids de calcite pure de référence mise en oeuvre.

Quand l'expérience sur la calcite est terminée, on calcule le résultat de la manière suivante :

V' étant le volume de CO, provenant de la calcite

V celui provenant de l'échantillon

P le poids de CO₂ correspondant au poids de la calcite

(1 gr de calcite pure contient 0,4397 gr de CO_2)

x celui contenu dans l'échantillon, on a :

 $\frac{V'}{V} = \frac{P}{x}$

A₃ - TECHNIQUE D'EXTRACTION DES CONODONTES

1. Attaque de l'échantillon

Dans un erlenmeyer rempli aux 3/4 d'une solution d'acide acétique dilué à 14 % obtenue en additionnant 1 volume d'acide acétique pur cristallisable à 6 volumes d'eau, l'échantillon de roche calcaire est déposé sur le fond, sans broyage préalable.

Au bout de 6 heures d'attaque, la boue sédimentée au fond de l'erlenmeyer est prélevée sur une colonne de deux tamis de diamètre 0,280 et 0,100mm; le reste de l'échantillon reste dans le bain acide.

2. La récolte des conodontes

Le contenu de chaque tamis est récupéré sur papier filtre et mis à sécher à l'étuve dont la température n'excède pas 50°C.

Le tri des conodontes s'effectue sous la loupe binoculaire sans séparation préalable par une liqueur dense.

Cette technique d'extraction permet d'obtenir des conodontes non fragmentés par le broyage et l'emploi de la liqueur.