

50376  
1985  
155

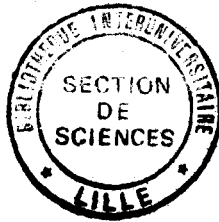
50376  
LILLE 1985 n° ordre 118  
1985  
155

THESE présentée à l'Université des Sciences  
et Techniques de Lille pour obtenir le

Diplôme Supérieur de Recherche de l'USTL, ancienne dénomination:

## DOCTORAT D'UNIVERSITE

(mention géologie appliquée)



par Pascal DOREMUS

LES ANOMALIES URANIFERES DANS  
LE GEDINNIEN INFERIEUR DE  
L'ANTICLINAL DE L'ARDENNE (Oizy, Belgique):  
Prospection, Sédimentologie, Tectonique  
et Géochimie.

Soutenue le 8 Juillet 1985 devant la Commission d'Examen

MM. P. DE BRABANT                      Président

J.M. CHARLET                              )  
M. WATERLOT                              )      Rapporteurs

Y. QUINIF                                    )  
P. VUILLEMENOT                          )      Examineurs

Travail effectué à la FACULTE POLYTECHNIQUE de  
MONS (BELGIQUE) et à l'UER des Sciences de la Terre de l'UNIVERSITE de LILLE I  
(FRANCE).

à Marie-Claire

à mes enfants

*Grégoire*

*Ta vie débutait, balbutiant,  
tu t'envolais souriant.*

*Las! le Ciel, tes ailes a coupées,  
et soudain tu as chuté.*

*Le monde tourne, tourne  
seul dans sa folie.*

*Toi tu es déjà parti!*

## A V A N T - P R O P O S

Ce mémoire de thèse est le fruit d'un travail réalisé dans le cadre de la collaboration scientifique établie entre l'Université des Sciences et Techniques de Lille et la Faculté Polytechnique de Mons (F.P.Ms, Belgique).

Je tiens, avant tout, à exprimer au Professeur M. WATERLOT ma profonde gratitude de m'avoir permis de réaliser ce mémoire en m'accueillant dans son laboratoire. Il a su par ses qualités humaines et pratiques m'aider à mener à bien ce travail, à passer les obstacles de toute nature. Il est de ceux qui m'ont fait aimer la Géologie, je l'en remercie de tout coeur.

J'exprime au Professeur J.M. CHARLET ma plus profonde gratitude pour m'avoir accueilli dans son équipe. Son encadrement scientifique, son enseignement sur la Géologie de l'Uranium, ses nombreux conseils et suggestions tant sur le terrain qu'au laboratoire m'ont été précieux. Ses qualités de formateur et d'homme m'ont grandement aidées dans le parcours qui s'achève par ce mémoire.

Monsieur Y. QUINIF, Docteur ès Sciences (F.P.Ms, Belgique), géochimiste de l'Uranium et du Radon, a été de ceux qui m'ont le plus aidé de ses conseils et par les discussions dont il n'est pas avare. Qu'il trouve ici, l'expression de ma vive et sincère gratitude.

Monsieur P. DEBRABANT, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille et à l'E.U.D.I.L. me fait l'honneur de présider mon jury. En tant que géochimiste, il m'apporte l'avis d'un spécialiste, je l'en remercie.

Monsieur P. VUILLEMENOT du Service d'Hydrogéochimie de la C.O.G.E.M.A. a accepté de participer à mon jury. Mon travail, à travers lui, bénéficiera de l'avis d'un spécialiste de la prospection du Radon dans les eaux naturelles. Je l'en remercie sincèrement.

Je tiens à remercier aussi :

- le personnel du laboratoire de Minéralogie (F.P.Ms), des groupes G.E.P., S.E.R.A.K. et "Malogne"; l'ambiance qu'ils ont su créer, m'a grandement aidé dans le déroulement de mon travail. Que Brigitte PIERRARD trouve ici mes remerciements pour les nombreuses opérations "Orangina" et les dosages qu'elle a effectués ainsi que le témoignage de l'agrément que j'ai eu à travailler avec elle. Que Raphaël CANTILLANA soit ici remercié de sa discrète gentillesse et de son aide efficace; de même Philippe BOUKO dont les conseils et avis sur le comportement du Radon et la qualité de la bière belge m'ont été précieux. Les mots et la place me manquent pour remercier tous les autres, qu'ils sachent que je les remercie de tout coeur pour leur gentillesse et leur aide devant les problèmes que j'ai pu leur soumettre.



- les enseignants-chercheurs qui m'ont cotoyé pendant toutes ces années, Christian BECK et Jean-Marie DEGARDIN; ils m'ont aidé de leurs conseils, les discussions et la part de camaraderie qu'ils m'ont offerts;
- tous mes camarades lillois qui m'ont accompagné durant ces longues années. Luc DORCHIES qui, tout comme moi, a fréquemment effectué le trajet Lille-Mons. Nos discussions ont été nombreuses et fructueuses. Thierry IMBERT qui malgré quelques trapillons, a su prendre le risque de venir sur le terrain, sa vivacité d'esprit et son humour sont un appui précieux. Je remercie également Claudine BERQUER, Annie MASTRANGELO, Hervé COULON, Yves DESPEYROUX, Pierre de HEDOUVILLE qui ont, eux aussi, directement ou indirectement, participé à l'élaboration de ce travail. Sans eux la vie d'étudiant serait sans doute moins ensoleillée;
- toutes les personnes qui, dans l'ombre, ont participé à la réalisation de ce travail de recherche et à celle de ce mémoire : Madame M. MASSINON pour la dactylographie, Madame A. BREBION pour le soin de ses tirages offset, M. J. CARPENTIE pour les travaux photographiques et la sympathie dont il sait entourer les gens qui viennent le solliciter à toute heure, M. M. PLUQUIN pour la réalisation des surfaces polies et inclusions, pour les problèmes matériels quotidiens et multiples qu'il sait résoudre avec efficacité et cordialité.

Que ma famille trouve ici l'expression de ma gratitude. De mes parents, j'ai appris le goût de l'effort et d'un certain dépassement de soi qui m'ont été indispensables ces dernières années.

Je ne peux achever ces remerciements sans y associer la mère de mes enfants, ma compagne dans la vie. Elle a su accepter ce qui a été parfois une épreuve. La géologie est, pour elle, synonyme de solitude. Je lui dédie ce mémoire qui est aussi, dans un certain sens, le fruit de notre union.

Merci à tous.

A B S T R A C T

The radiometric prospection of the Gedinnian in the Ardenne massive point out an abnormal radio active area around Oizy (in vicinity of Bouillon). This anomaly extends in the "Quartzophyllades de Braux" Relations with a formation fracturing are obvious.

Observation on the field, sedimentological, geochemical and statistical analysis lead to indicate :

- the uranium is in fractures fillings with iron minerals. Mineralogical studies show relations between iron grade, lepidocrocite cristallinity, illite percentage and uranium grade;
- the rock uranium is in abnormal concentration in fractures walls or microfractured rocks. Mineralogical and "anticoïncidence" studies shows the uranium connection with organic mater, iron hydroxides and illites;
- autoradiographies and "anticoïncidence" studies confirm the iron-uranium connection; the rock radioactivity decrease in fractures walls;
- alpha and gamma spectrometries studies shows the supergen origin of uranium, is leaching in a subactual period.

To detect other "Oizy-type" anomalies under coverage, a new fast technic of radon detection in natural springs waters hase been applied. It is based on Radon extracting by organic liquids.

The hydrochemical prospection shows effects of climatic variations on the radon concentration in natural springs waters. The pluviometry affects the radon dilution; the atmospheric pressure appears to facilitate radon emanation.

Three anomalies have been detected by this method and by soils radon prospection. The springs waters radon due to the existence under the recent coverage "Oizy-Type" uranium anomalies or seepages.



1<sup>ère</sup> PARTIE







# CHAPITRE I

INTRODUCTION





## CHAPITRE I.- INTRODUCTION - PRESENTATION DU SUJET

### 1.1. GENERALITES

Au cours des dernières décennies, les problèmes énergétiques soulevés par la crise pétrolière ont conduit à une relance des programmes de prospection d'énergie nouvelle (ou de remplacement). Conséquence de l'évolution des prix du combustible nucléaire, la prospection de l'Uranium fut intensifiée et l'exploitation des gisements à plus basse teneur ou de sources non conventionnelles (schistes noirs, phosphates ...) fut envisagée. C'est dans ce contexte que les communautés européennes ont entrepris une reconnaissance générale du Paléozoïque de Belgique, le projet fut confié au Service Géologique qui travailla en collaboration avec trois Universités: l'Université libre de Bruxelles pour l'hydrochimie, l'Université Catholique de Louvain-la Neuve (Géochimie) pour la prospection géochimique en "stream sediment", la Faculté Polytechnique de Mons (F.P.Ms, Laboratoire de Minéralogie) pour la prospection radiométrique autoportée.

Si, à l'heure actuelle, les grands pays tels que les U.S.A., se sont détournés plus ou moins de la voie nucléaire, tant pour des raisons énergétiques que pour des raisons de politique intérieure (les poussées écologistes n'étant pas négligeables), l'Europe, bien que sensible au facteur politique, n'en demeure pas moins fortement engagée dans la voie du nucléaire. Ce dernier représente pour elle une issue de secours. D'autant plus que les gisements d'hydrocarbures sont relativement rares sur son territoire et coûteux à l'exploitation et que le secteur charbonnier européen est en total déclin.

### 1.2. PRESENTATION DU SUJET - BUTS DU TRAVAIL

#### 1.2.1. PRESENTATION DU SUJET

La prospection radiométrique autoportée, par voie spectrométrique, a couvert près de 20000 km d'itinéraires en trois ans (de 1979 à 1981). La compilation des mesures de terrain a permis de définir un certain nombre d'anomalies qui se répartissent dans trois zones principales (CHARLET *et al*, 1983) (voir carte de situation).



- le Viséen du bassin de Dinant qui fit l'objet du travail de M. NDZIBA (1982);
- le Revinien supérieur de la bordure du Massif de Stavelot (J.M. BOLLE, 1981);
- le Dévonien inférieur de la Haute Ardenne :
  - . avec le Siégénien du Bassin de Neufchateau (L. DORCHIES, 1984);
  - . et le Gédinnien de l'Anticlinal de Bastogne-Paliseul : Anomalie de Daverdisse située sur son flanc Nord (DEJONGHE *et al*, 1982; JEDWAB *et al*, 1982), Anomalie d'Oizy située dans le coeur de l'anticlinal et qui fait l'objet de cette étude.

Les deux premiers secteurs étaient classiquement connus comme zones anormales en Uranium, notamment dans les faciès "schistes noirs". Mais les anomalies relevées en Haute Ardenne sont nouvelles.

Grâce à M. le Professeur J.M. CHARLET, avec l'accord de M. le Professeur M. WATERLOT, j'ai pu entreprendre mes recherches sur l'anomalie d'Oizy et ses éventuels prolongements. Cette étude est entrée dans le cadre d'une collaboration déjà longue et fructueuse entre l'UER des Sciences de la Terre de l'Université de Lille et la F.P.Ms (Laboratoire de Minéralogie, Groupe G.E.P.).

#### 1.2.2. Les buts du travail

Les buts du travail étaient multiples :

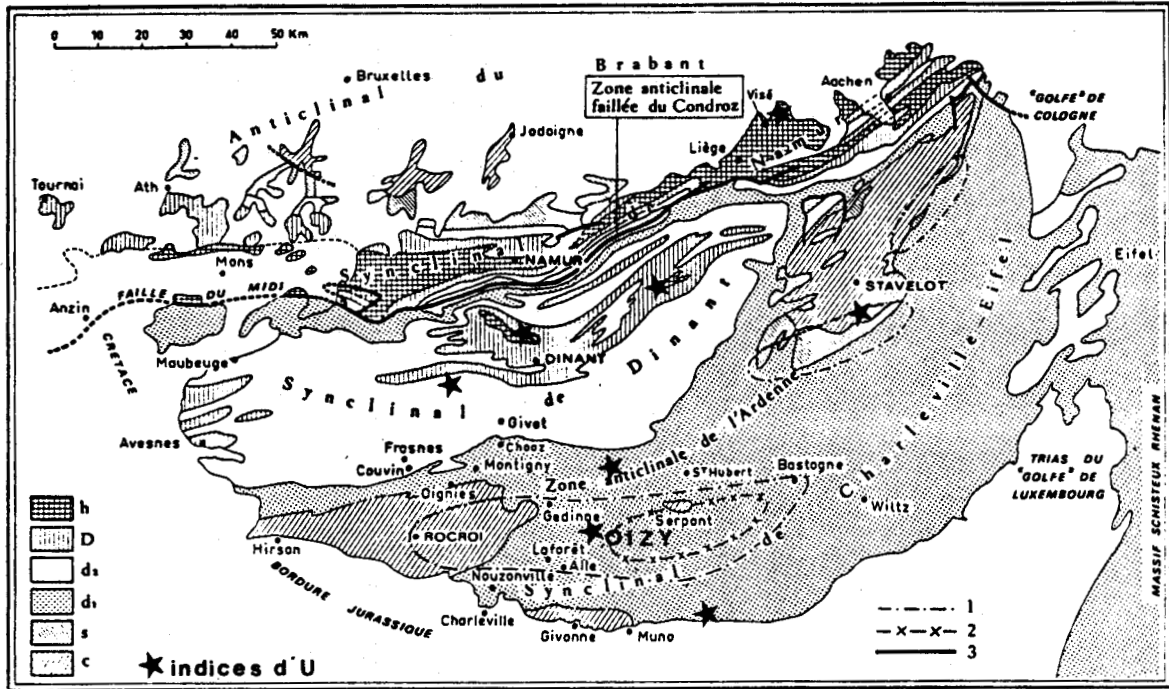
- tout d'abord, à partir d'un levé radiométrique pédestre (scintillateur portable), étudier les anomalies mises en évidence par la prospection autoportée. Dans ce même temps, j'ai tenté de retrouver d'autres anomalies radiométriques;

- rechercher des anomalies sous couverture en mettant au point et en appliquant un nouveau mode de prospection des anomalies cachées par le biais de la détection du Radon dans les eaux de source. J'ai tenté d'ébaucher la compréhension de certaines influences extérieures sur la méthode appliquée;

- préciser le contexte géologique des anomalies décrites en tentant d'en comprendre le contrôle géologique : tectonique, sédimentologique, géochimique;

- enfin proposer un modèle expliquant les conditions de concentration et le dépôt des radioéléments.

Afin de faciliter la compréhension de certains phénomènes au lecteur, je présente, avant les résultats, un bref rappel sur les comportements de l'Uranium et du Radon.



Carte de situation des principaux indices uranifères (d'après G. WATERLOT, 1974; J.M. CHARLET, 1984).

h, terrain houiller. - D, Dinantien. - d<sub>2</sub>, Dévonien supérieur et moyen. - d<sub>1</sub>, Dévonien inférieur. - s, Siluro-Ordovicien. - c, Cambrien. - 1, Limite de l'épizone (à chlorite). - 2, Limite de la mésozone (à biotite). - 3, failles.





## CHAPITRE II

COMPORTEMENTS DE L'URANIUM ET DU RADON





## CHAPITRE II.- COMPORTEMENTS DE L'URANIUM ET DU RADON

### 2.1. L'URANIUM

#### 2.1.1. SOURCES ET PARCOURS DE L'URANIUM

J'appelle source d'un gisement uranifère reconnu soit la source au sens strict du terme : le granite leucocrate (ou granite fertile) et tout matériel d'origine intrusive qui puisse s'y raccorder, soit, au sens large, un précédent stade d'évolution à partir duquel on a pu aboutir au phénomène observé.

De plus, il est bon que je précise que, dans ce qui suit, je n'évoquerai que des gisements d'origine supergène.

Tout ceci me permet de ne traiter que des affinités sédimentaires de l'Uranium se rapportant à ce travail. Il est possible de situer ce type de gisement dans le tableau de la figure 1 (d'après DAHLKAMP, 1980).

En figure 2, je schématise quatre types de concentrations uranifères qui intéressent mon travail. A partir de cette figure, il faut définir un certain nombre de mots-clés (altération, transport, fracturation, concentration).

Dans les 4 cas illustrés, l'altération d'une source est nécessaire à la mobilisation de l'Uranium présent en son sein. J'ai figuré un granite fertile mais ce pourrait être un ensemble sédimentaire "fertile".

L'Uranium présent au sein des granites fertiles est lié d'une part à des minéraux sensibles à l'altération (microcristaux d'Uraninite), d'autre part à des minéraux réfractaires à cette même altération (Zircon, Apatite, Monazite...) et qui dans certaines conditions peuvent constituer des placers dans des paléochenaux (DEFFEYES et MacGREGOR, 1980; BASHAM, BALL, BEDDOE-STEPHENS et MacMICHIES, 1982).

A partir de cette source érodée, altérée, un transport de l'Uranium pourra se faire sous diverses formes : dans des minéraux résiduels (Zircon...), par mise en solution. En effet (voir 2.1.2.), l'Uranium est très facilement soluble dans l'eau (de nappe superficielle).

Quelle que soit la forme du transport mécanique ou chimique, celui-ci n'est pas le seul élément moteur de la formation de concentrations sédimentaires. Il faut faire intervenir d'autres facteurs.

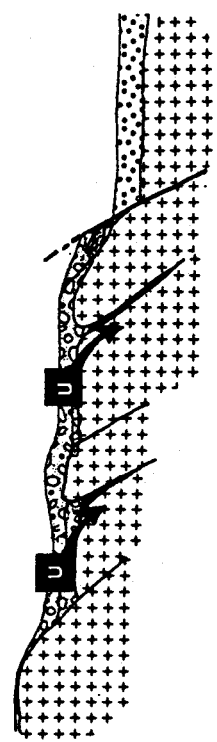
ORIGINE	Roche Mère Type de Dépôt	EXEMPLE	
SEDIMENT.	CONGLOMERATS	ELLIOT QUIRKE LAKE (CAN)	
	BLACKSHALES	RANSTAD (S)	
	PHOSPHATES	FLORIDA (USA)	
EFFUSIVE	VOLCANIQUE ACIDE	PEÑA BLANCA (MEX)	
INTRUSIVE	ALASKITES GRANITES	RÖSSING (S-O AFR) BINGHAM (USA)	
	PEGMATITES	ROSS ADAM (USA)	
	FILONS HYDROTHERM.	SCHWARTZWALDER (USA)	
Métasomatose	CALCO SILICATES	MARY KATHLEEN (AUSTRALIE)	
Métamorph.	SCHISTES	PORTUGAL	
SUPERGENE	FILONIEN	MASSIF CENTRAL (F)	
	GRESEUX	Pénéconcordant	GRANTS MINERALS BEDS (USA)
		Roll-Front	WYOMING BASINS (USA)
		Tectono Sédiment.	FRANCEVILLE (GABON)
	CALCRETE	YEELIRRIE (AUSTRALIE)	
	LIGNITES	N-S DAKOTA (USA)	
	PHOSPHATES	BAKOUMA (ZAR)	
KARST	SIGHORN WYOMING (USA)		

D'APRES DAHLKAMP 1980

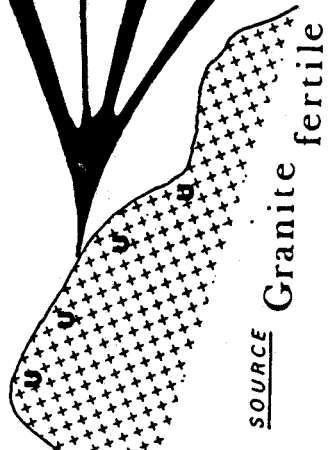
Fig. 1 : Classification des gisements d'Uranium à partir de leurs origines (exemples)

Les facteurs tectoniques peuvent jouer de diverses façons. Un massif fertile, fracturé, peut voir se développer à sa surface un manteau d'altération qui met l'Uranium en mouvement. Celui-ci peut alors se piéger dans des fractures ouvertes (voir 2.3) (fig. 2, 1).

1 Concentration filonienne

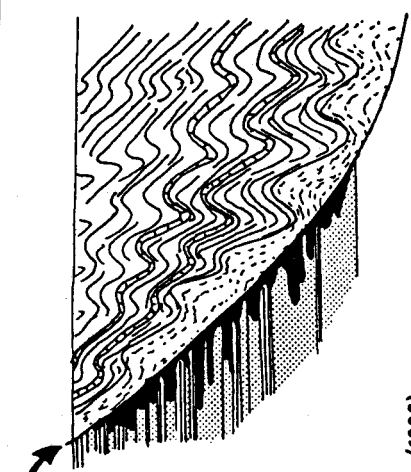


Fracturation (f)  
Altération (a)

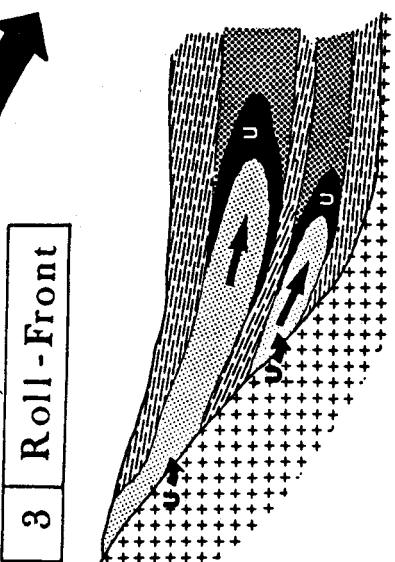


(a), Transport (t)

2 Tectono-Sédimentaire

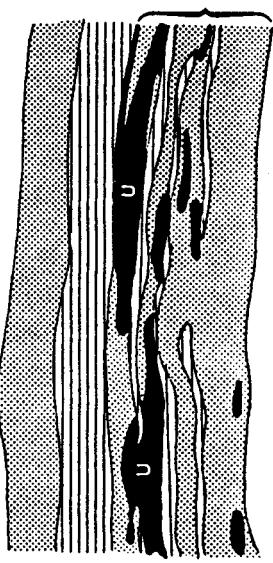


3 Roll-Front



(a), (t)  
(a), (t)

d'après Dalhkamp (1980)



4 Dépôt Pénécordant

d'après Grutt (1972)



FIG 2: GISEMENTS D'ORIGINE SUPERGENE - SCHEMATISATION



Les fluides supergènes, chargés en Uranium issu de l'altération de la source, peuvent à la faveur d'une discontinuité tectonique, venir imprégner des niveaux poreux et amener le développement d'une concentration tectono-sédimentaire. C'est le cas de Mikouloungou au Gabon (fig. 2, 2) (P.DIOULY-OSSO et R.J. CHAUVET, 1979). Dans les deux cas, la tectonique commande mais la concentration obéit à des facteurs sédimentologiques et lithologiques.

Il y a des cas où les facteurs lithologiques sont primordiaux, ce sont ceux des gisements de type Roll-front et pénéconcordant.

Dans le premier cas (fig. 2, 3) on observe au sein d'un milieu poreux (bancs de grès, d'arkoses) encadré par des niveaux imperméables (pélites, argilites) (L. DORCHIES, 1984) le développement d'une concentration en Uranium rendu possible par la circulation de fluides oxydants qui mobilisent le gisement. En effet, dans ces bancs de grès réducteurs, à l'origine, pièges à uranium, la circulation des eaux atmosphériques oxyde le faciès qui tend à se rubéfier. La concentration maximale se situe alors au niveau du front d'oxydo-réduction.

Dans le cas des gisements pénéconcordants (fig. 2, 4), la porosité du milieu est, elle aussi, le fait essentiel. Le plus souvent, on est en présence de paléoenvironnements laguno-lacustres ou deltaïques (DAHLKAMP, 1980). Le caractère divagant de ces environnements amène la création de micro-milieus réducteurs (accumulation de matières organique, de pyrite ...) favorables au piégeage de l'uranium amené par les eaux circulant dans ces milieux poreux (voir en 2.1.3).

#### 2.1.2. LE COMPORTEMENT CHIMIQUE DE L'URANIUM

J'ai utilisé comme base de travail les synthèses réalisées par mes prédécesseurs lillois (M. NDZIBA (1982) et L. DORCHIES (1984)). Comme ces derniers, j'ai consulté les travaux des auteurs suivants : GAUTHIER (1961), MARTIN (1962) GRANSTOFF (1976), LANGMUIR (1978), ROUZAUD (1979), GIBLIN *et al* (1981).

L'Uranium est un élément lithophile qui se rencontre à l'état naturel sous deux formes :

- l'ion tétravalent  $U^{4+}$
- l'ion hexavalent  $U^{6+}$

##### 2.1.2.1. L'ion uraneux $U^{4+}$

L'Uranium sous cette forme ne se rencontre pratiquement qu'en milieu

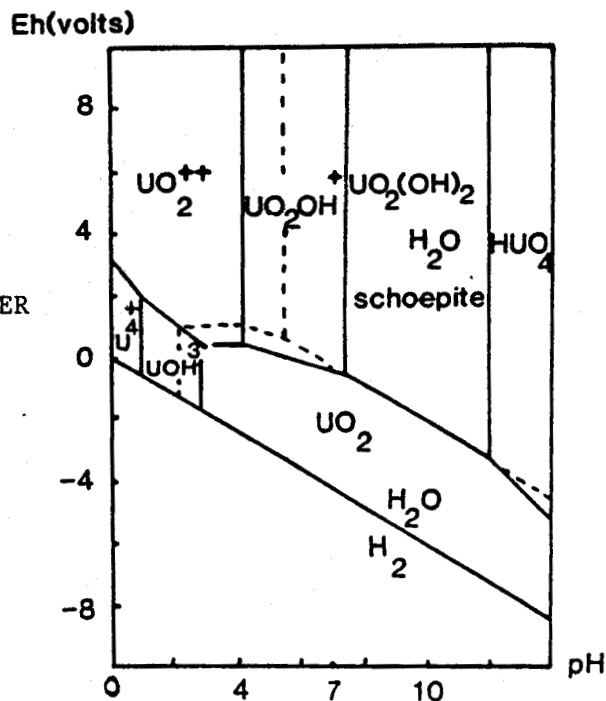
très acide (pH < 2) (fig. 3). C'est le cas des contextes hydrothermaux riches en eaux sulfureuses où  $U^{4+}$  est présent sous forme d'oxyde insoluble  $UO_2$ , l'Uraninite.

$U^{4+}$  peu soluble et peu mobile, existe néanmoins en solution. Il tend alors à s'oxyder en  $U^{6+}$  formant alors soit des ions uranyles  $UO_2^{2+}$

soit des ions uranates  $UO_4^{2-}$

ou  $U_2O_7^{2-}$

Fig. 3.- Système  $U-O_2-H_2O$   
à 25°C et 1 atm (d'après HOSTETLER  
et GARRELS, 1962)



### 2.1.2.2. L'ion hexavalent $U^{6+}$

Dans l'eau l'ion  $U^{6+}$  donne immédiatement  $UO_2^{2+}$ , le complexe uranyle qui est le plus stable en solution. De plus, fait intéressant pour nous, il est ainsi très mobile.

Mais cet ion n'existe que dans des conditions voisines d' $U^{4+}$ , c'est-à-dire dans un contexte très acide (pH < 2) (fig. 3). Si le pH augmente, une hydrolyse se produit donnant naissance à divers complexes selon les conditions de pH (fig. 3) :

- pour  $2 < pH < 5$  :  $U_2O_5^{2+}$
- :  $U_3O_6^{2+}$
- :  $(UO_2(OH)_2 UO_3)_n$

- à pH = 5, on a la précipitation de la Schoepite :  $3 \text{UO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

### 2.1.2.3. Complexation de $\text{UO}_2^{2+}$

Celle-ci se réalise facilement en présence d'ions tels que :  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$  ou même d'acides organiques. Selon les conditions de pH trois types de complexe peuvent exister (fig.4) :

- les uranyles sulfates à pH acides,
- les complexes organiques et fulviques au voisinage de la neutralité,
- les uranyles carbonates, en milieu oxydant, sur une large gamme de pH.

Se référant aux figures 3 et 4, on peut constater que la précipitation de l'Uranium est tributaire des modifications de pH, d'Eh, de température, de pression.

En milieu réducteur, l'ion uranyle donnera de l'Uraninite. Dans d'autres conditions l'Uranium pourra être fixé par des hydroxydes de fer, de manganèse, par des minéraux argileux, par des phosphates, par des matières réductrices.

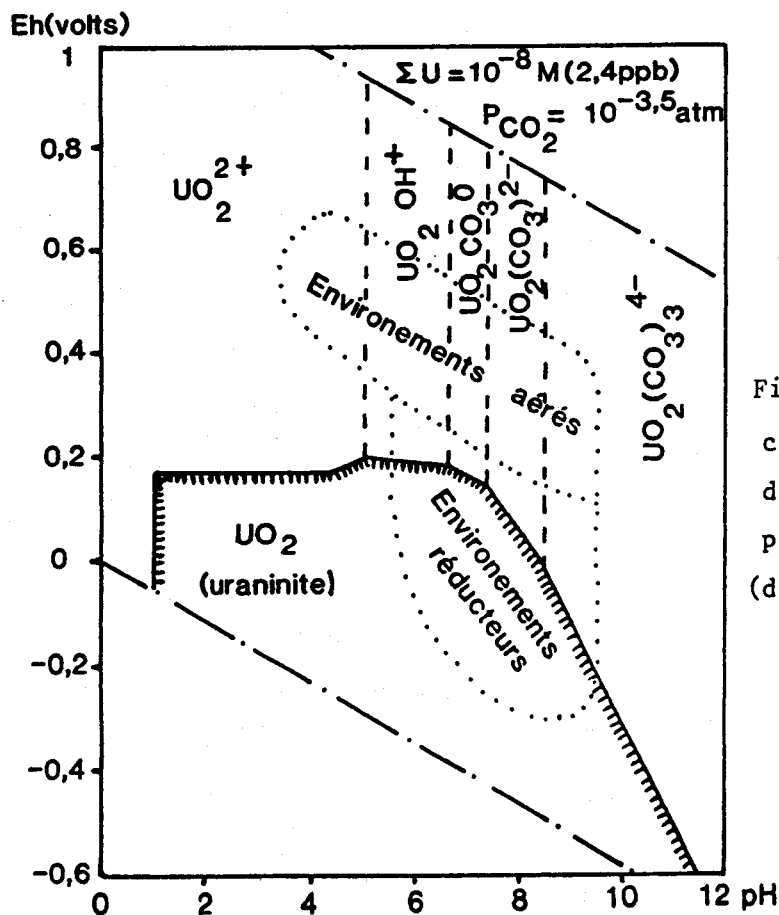


Fig.4 : Phases principales de l'uranium dans une solution simple d'eau.  
(d'après CAMERON, 1980)

2.1.3. LES LIAISONS POSSIBLES DE L'URANIUM AVEC DU MATERIEL SEDIMENTAIRE

J'ai évoqué dans les deux paragraphes précédents comment l'altération des sources primaires de l'Uranium le libère sous sa forme hexavalente. Après un transport plus ou moins long, cet Uranium peut précipiter syngénétiquement avec des sédiments ou alors épigénétiquement par percolation des eaux chargées en  $U^{6+}$  circulant en milieu poreux.

Dans cette migration sédimentaire de l'Uranium, divers "pièges" peuvent le retenir. Je les cite pour mémoire, je développerai certains thèmes dans la suite de ce paragraphe. Par ordre de "préférence", l'Uranium se fixe sur/avec/dans/ les phosphores, la matière organique, les argiles, les oxydes métalliques (Fe, Mn ...), les sulfures.

Selon les apports, le contexte, la nature des sédiments, il a été établi que les teneurs en Uranium varient largement. La figure 5 donne les teneurs moyennes de divers types de sédiments et de l'écorce terrestre. Ce tableau a été dressé d'après les travaux de CLARK *et al* (1966).

type de roche	K(%)	U(ppm)		Th(ppm)		Th/U		Th/K
	moyenne	moyenne	valeurs extrêmes	moyenne	val. extr.	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	écart large	5,9
calcaires	0,3	2	1-10	2	-	1	-	6,6
latérites	bas	10	3-40	50	8-132	5	écart large	-
moyenne de l'écorce terrestre	2,1	3	-	12	-	4	-	-

Fig. 5 : Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre (d'après CLARK *et al.*, 1966)

#### 2.1.4. L'URANIUM ET LA MATIERE ORGANIQUE

La liaison Uranium-Matière Organique (M.O.) est établie depuis longtemps. De nombreux travaux en traitent.

Cette liaison a été étudiée dans divers cas :

- les schistes noirs,
- les roches à matière organique dispersée (M.O.D.)
- les roches carbonées

Si M. NDZIBA (1982) et L. DORCHIES (1984) ont tous deux traité assez abondamment dans leur thèse de 3ème Cycle des relations de l'Uranium et de la M.O.D. au sein des schistes noirs, c'est qu'au cours de leurs travaux ils se sont trouvés confrontés à l'étude de ce type de faciès. Ce ne fut pas mon cas. De leurs synthèses bibliographiques, il ressort que la fixation de l' $U^{6+}$  par la M.O. peut se faire selon des stades et des manières différentes. Ceci a été établi pour les schistes noirs mais reste vrai pour d'autres faciès.

D'après les travaux de DEGENS *et al* (1977), l'ion uranyle peut être fixé par des végétaux au sein de leurs tissus lors de leur croissance.

Pour Martin CALVO (1974), CAMERON (1980), l'Uranium peut se fixer sur des débris végétaux (donc largement après la croissance). Ceci se fait de diverses façons :

- . par adsorption sur des solides organiques,
- . par réduction de  $UO_2^{2+}$  en Uraninite ( $UO_2$ ) insoluble grâce au dégagement d' $H_2S$  issu de la décomposition de la M.O.

Dans le cadre de l'étude des liaisons Uranium-M.O., je me suis intéressé, entre autres, aux travaux de Martin CALVO (1974), SANGUINETTI *et al* (1982), DISNAR *et al* (1983), NAKASHIMA *et al* (1983).

Selon Martin CALVO (1974) "lorsque les solutions uranifères (chargées en  $UO_2^{2+}$ ) entrent en contact avec de la M.O. la qualité et la nature de l'association urano-organique établie dépend du rang de carbonisation atteint par le matériel humique" (traduit de l'espagnol par moi-même). Il indique d'ailleurs que du point de vue pétrographique les macéraux \* du groupe de l'huminite sont ceux qui se lient le mieux à l'Uranium. D'autre part, il

---

\* On appelle macéral en pétrographie des charbons les composants microscopiques de ce dernier. Le terme a été créé par analogie avec celui de minéral. Ils sont caractérisés par leur pouvoir réflecteur.

avance le fait que les concentrations intéressantes du point de vue économique ne peuvent se faire de cette façon si la M.O. est trop abondante. Pour lui, les proportions sont difficilement déterminables mais la M.O. ne doit être présente au sein de la roche qu'en tant que constituant accessoire. En somme c'est alors de la M.O.D.

Lors de l'étude pétrographique des faciès que j'ai rencontrés sur le terrain, j'ai trouvé de nombreux bancs de grès à stratifications entrecroisées soulignées de microlits de matière organique (cf. 1ère partie, Ch. III et 3ème partie, Chap. IV). Dans les autres faciès (toujours assez perturbés du point de vue sédimentaire), la M.O.D. est présente dans de faibles proportions cependant.

Je me suis donc intéressé à des travaux du type de ceux de H. SANGUINETTI *et al* (1982). Ces auteurs ont étudié la localisation de l'Uranium dans les figures de sédimentation d'un grès.

Ces grès, à stratifications entrecroisées, présentent des microlits de débris végétaux très fortement pyritisés, piégeant l'Uranium.

Assez récemment, S. NAKASHIMA *et al* (1983) ont publié les résultats d'une étude expérimentale sur les mécanismes de concentration de l'Uranium par de la M.O. sédimentaire (du lignite en l'occurrence). Ils ont mis en évidence deux phénomènes: .la fixation d'espèces uranylées par le lignite; . la réduction de ces mêmes espèces uranylées de l'état hexavalent ( $U^{6+}$ ) à l'état tétravalent ( $U^{4+}$ )

Ces phénomènes se déroulent dans des conditions de diagenèse croissante:

- la fixation se produit à partir de 45°C;
- la réduction se produit à partir de 180°C.

Ces processus peuvent être syngénétiques, diagénétiques et même épigénétiques.

#### 2.1.5. L'URANIUM ET LES OXYHYDROXYDES DE FER

L'Uranium peut être associé aux oxyhydroxydes de fer de deux façons :

- par fixation au sein de concentrations ferrifères,
- au niveau des fronts d'oxydation-réduction par transformation des pyrites (au sein de Roll-Front par exemple).

L. DORCHIES (1984) s'est intéressé au comportement de l'Uranium et du Fer (réduit et oxydé) au niveau des fronts d'oxydo-réduction. Pour ma

part, je me suis plus orienté vers l'étude des concentrations ferrifères pédogénétiques et/ou liées au développement de manteaux d'altération supergène.

J'ai fait appel dans mon travail aux écrits de : FERNANDEZ POLO (1970), HARSHMAN (1976), GUILLET *et al* (1976), PELISSONNIER (1979), EULRY *et al* (1980), SAMAMA (1980), MICHEL (1981), GUENIOT *et al* (1982), SAMAMA (1982).

On verra en 2-3 ce que l'on peut tirer de certains de ces travaux, dans le présent paragraphe, je m'intéresse plus particulièrement aux travaux de MICHEL (1981) et GUENIOT *et al* (1982) qui se rapportent tous deux aux modalités de la liaison Fer-Uranium.

D. MICHEL (1981) montre dans l'étude de faciès gréseux minéralisés, fortement soumis à une altération rubéfiante (sidérolithique), une corrélation Fer-Uranium.

Il y a une distribution commune du Fer, de l'Uranium et du Phosphore. Les ions phosphates servant d'intermédiaire entre l'Uranium et le Fer dans la fixation sur les hydroxydes de Fer (Goethite, Lépidocrocite). Dans les phases fines (donc le plus souvent à grande surface spécifique) on peut aussi constater la fixation de l'Uranium sur des particules ferriques mais ici sans intervention des ions phosphates. Dans les deux cas, la fixation (absorption, adsorption) se réalise dans une gamme de pH de 6 à 8 .

B. GUENIOT *et al* (1982) ont étudié la fixation de l'Uranium sur la Lépidocrocite dans des sols hydromorphes, en climat froid. Il ressort de leur étude que l'Uranium dans ces conditions d'accumulation supergène est associé à celle du fer (et accessoirement du manganèse) :

- soit adsorbé et concentré dans la frange amorphe des oxyhydroxydes de Fer,
- soit substitué dans les réseaux cristallins eux-mêmes, mais pour une moindre part.

D'autre part, la Lépidocrocite concentrée dans les fines fractures peut provoquer une adsorption massive de l'Uranium du fait d'une grande surface spécifique. Ce minéral voit souvent se développer une cristallisation progressive (SCHWERTMANN et TAYLOR, 1972) au cours de laquelle l'Uranium adsorbé peut s'intégrer aux réseaux cristallins.

Ces deux exemples bibliographiques permettent de distinguer des points communs mais aussi des différences dans des concentrations supergènes liées à l'altération :

- dans le premier cas, les conditions de pH et d'Oxydo-réduction sont très importantes;
- dans le second cas, l'Uranium est avant tout mobilisé par des vecteurs organiques puis fixé par adsorption préférentielle sur un minéral néoformé de fer oxydé : la Lépidocrocite.

#### 2.1.6. GISEMENTS URANIFERES ASSOCIES A DES ALTERATIONS SUPERGENES (exemples)

Deux exemples ont attiré mon attention lors de mon étude bibliographique. Il s'agit des gisements uranifères de la région de Salamanque en Espagne (FERNANDEZ POLO, 1970, fig. 9) et de ceux situés à la périphérie du Mont Lozère en France (EULRY et VARGAS, 1980).

Dans les deux cas, le point de départ est constitué par des batholites granitiques "fertiles" (10 à 15 ppm en U), leur âge est hercynien à tardihercynien. Leur encaissant est formé d'une série schisto-gréseuse qui a été métamorphosée lors de la mise en place des granites et/ou des mouvements orogéniques (hercyniens et/ou alpins).

La série schisto-gréseuse est riche en éléments susceptibles de fixer l'Uranium : matière organique, Pyrite, minéraux phylliteux ou titanés.

Les deux auteurs suscités indiquent, pour la genèse de la concentration de l'Uranium dans la série détritique, les mêmes conditions de dépôt à savoir, en plus des concentrations initiales déjà citées :

- la topographie : un piégeage peut se réaliser dans un système en horst et grabben, qui aide l'écoulement des eaux chargées en Uranium vers les schistes (fig. 6) ;
- l'activité tectonique, favorisant les processus métallogéniques par "rajeunissement" des reliefs lors des périodes post-orogéniques, crée ainsi de nouveaux apports d'Uranium (issu de l'altération du granite), permet des reconcentrations successives vers le bas : gisements *per descensum*;
- les conditions climatologiques doivent être favorables à ces phénomènes. Ils nécessitent un fort développement de l'altération et un drainage important : un climat tropical, à saisons contrastées, par exemple;
- les concentrations ainsi développées peuvent être fossilisées par de nouveaux dépôts sédimentaires.

Pour conclure ce paragraphe, je citerai un extrait d'EULRY et VARGAS (1980) me paraissant synthétiser le déroulement des phénomènes conduisant



(A) : Mécanismes de minéralisation en relation avec les niveaux.

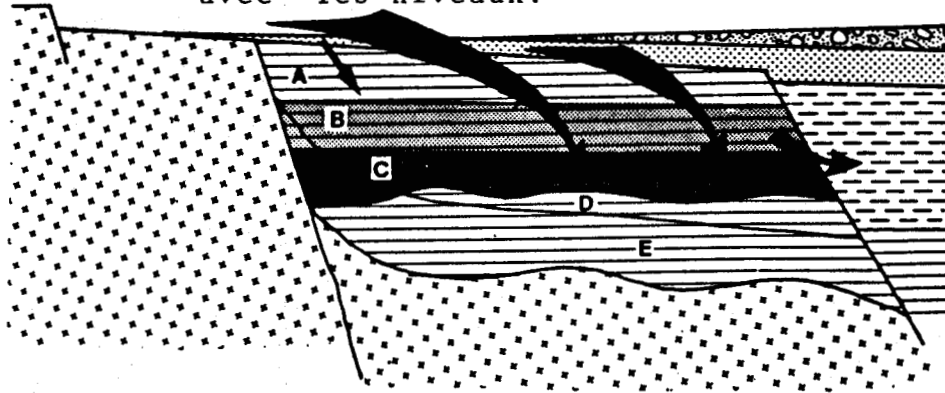
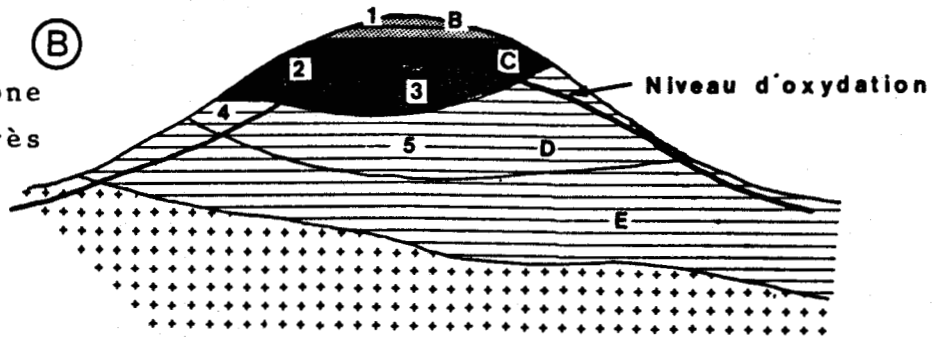







Schéma de la zone minéralisée après l'érosion quaternaire



**LEGENDE**

-  Pliocène
-  Miocène
-  Eocène
-  série schisteuse
-  granites

- 2 zone de réduction antérieure oxydée, alteration de la minéralisation
- 4 zone d'imprégnation superficielle

- A zone de forte oxydation
- B zone d'oxydation réduite
- C zone de réduction, pechblende
- D réduction sans minéralisation
- E roche compacte, pas de circulation
- 1 oxydation, conservation de la minéralisation
- 3 réduction préservée
- 5 zone non atteinte par les processus minéralisants

d'après Fernandez Polo  
(1970)

Fig. 6 : Schématisation des conditions de dépôt d'un gisement lié à une alteration supergène (cas des gisements de la région de Salamanca, Espagne).

à la formation de ces gisements :

"La reconstitution paléotopographique de la surface d'altération fait clairement apparaître que le batholite du Mont Lozère se situait, lors du développement des altérites, en position haute par rapport à l'encaissant cristallophyllien situé au sud. Ces roches étaient soumises à une pédogenèse de type tropical à saisons contrastées. Lors de la période humide, l'apport d'eaux météoriques oxydantes favorise l'hydrolyse des silicates et la libération de l'Uranium des granites. Pendant la période sèche, l'abaissement du niveau phréatique provoque le soutirage des eaux des arènes granitiques situées en amont. Ces solutions véhiculent l'Uranium (probablement sous forme d'uranyl carbonate) vers les zones basses et notamment vers les altérites développées sur schistes. Dans ces roches, du fait de l'abaissement de la nappe, la pyrite portée en zone oxydante libère du fer et du soufre qui sont entraînés dans la zone réductrice située sous la nappe où ils précipitent sous forme de sulfures secondaires avec une partie de l'Uranium provenant du granite."

## 2.2. LE RADON

### 2.2.1. GENERALITES

Le Radon, gaz radioactif, est omniprésent dans la nature. Selon qu'il appartient à l'une ou l'autre des trois familles radioactives naturelles, il est de nature différente :

- 1'  $^{238}\text{U}$  conduit au  $^{222}\text{Rn}$  : le Radon (fig. 7)
- 1'  $^{232}\text{Th}$  conduit au  $^{220}\text{Rn}$  : le Thoron
- 1'  $^{235}\text{U}$  conduit au  $^{219}\text{Rn}$  : l'Actinon

Ce sont, avec l'Hélium (émetteur alpha), les seuls éléments gazeux radioactifs issus de ces désintégrations. On peut les discriminer grâce à la durée de leur demi-vie :

- 3,82 jours pour  $^{222}\text{Rn}$
- 54,2 sec. pour  $^{220}\text{Rn}$
- 3,92 sec. pour  $^{219}\text{Rn}$

Il est donc clair, au vu de ces périodes, que le Radon est celui des trois qui fournira des messages significatifs sur les plus longues distances.

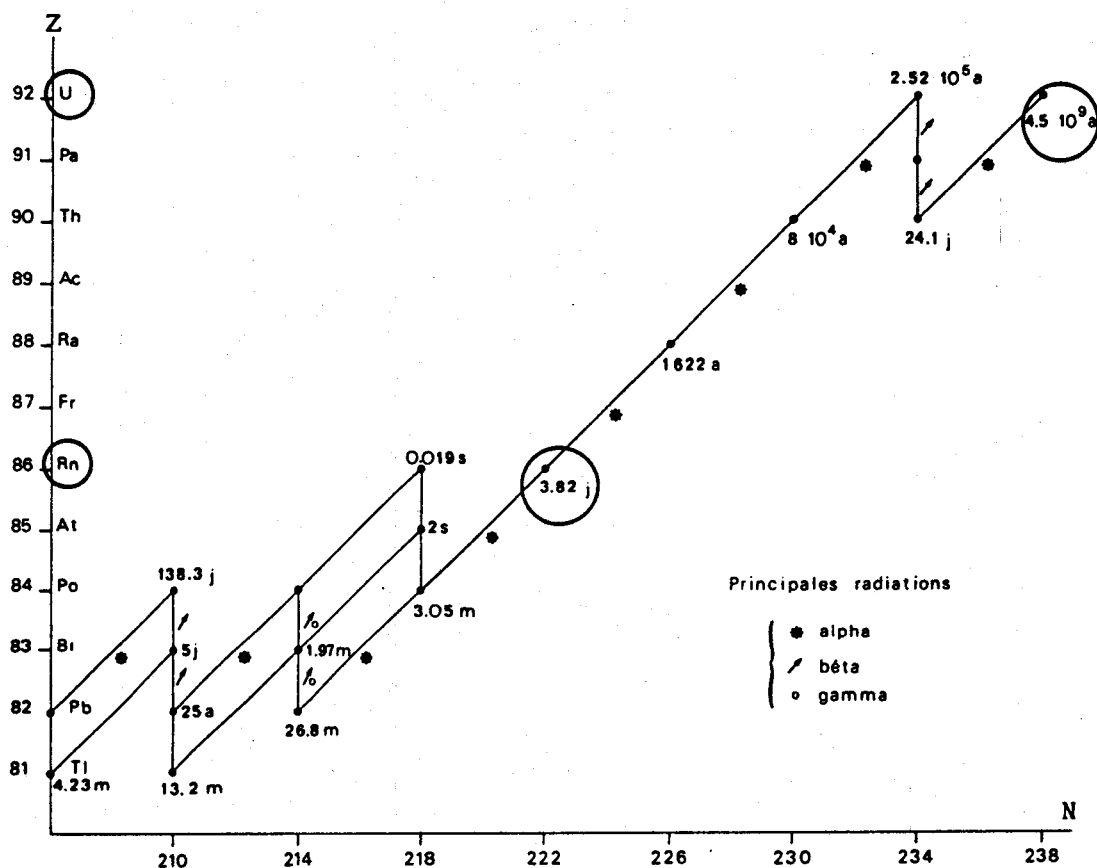


Fig. 7 : La famille de l'uranium 238

Z= nombre atomique  
N= nombre de masse.

Je soulignerai le fait que chacun de ces éléments passe par un "stade" Radium avant de devenir gazeux. Généralement ce phénomène contribue à la création d'auréole de Radon autour de la source Uranium (fig. 8). Ce fait n'est pas à perdre de vue par le prospecteur. Une prospection Radon ne peut en aucun cas être une fin en soi dans la détermination de gîtes uranifères.

### 2.2.2. MIGRATION DU RADON

Trois phénomènes interviennent dans la migration du Radon depuis sa source jusqu'à l'interface sol-air où il est détecté :

- le pouvoir émanateur des roches,
- la diffusion du Radon,
- le transport par une phase gazeuse ou liquide

Ces phénomènes ont été décrits dans deux thèses assez récentes (A. ODDCU, 1981; J.L. SEIDEL, 1982) et dans un article de W.M. TELFORD (1983).

### 2.2.2.1. Le pouvoir émanateur

Celui-ci est fonction : - de la façon dont le Radium est distribué dans la roche mère;  
- de la forme et de la température des minéraux porteurs.

L'existence de ces facteurs implique que seule une partie du Radon généré par la source peut émaner. L'autre partie reste intégrée à la roche et se désintègre sur place.

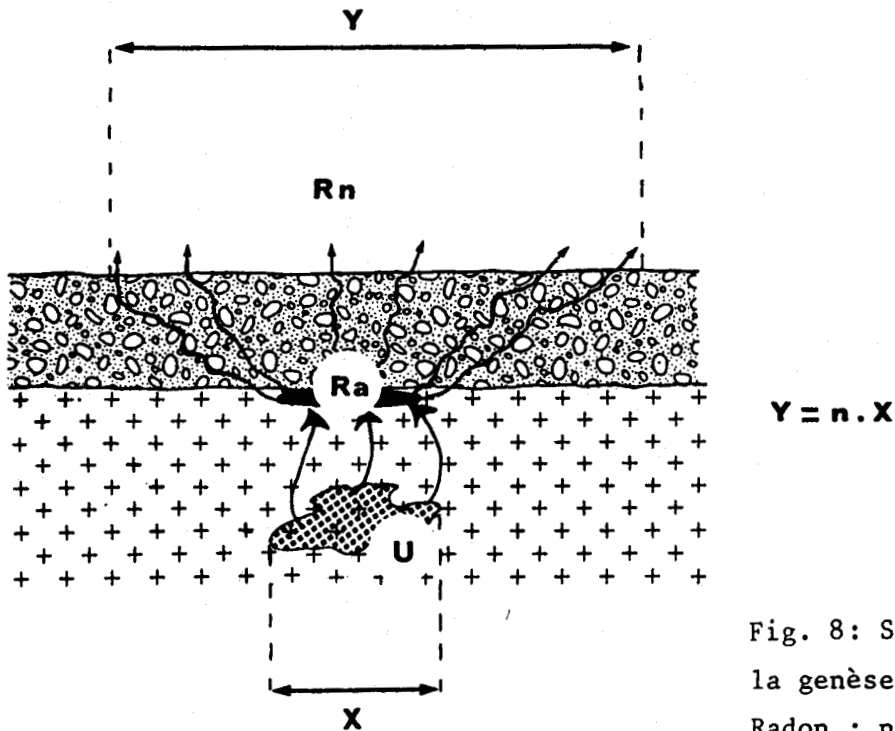


Fig. 8: Schématisation de la genèse d'une auréole de Radon : n est fonction des conditions de migration.

Le pouvoir émanateur sera fonction de l'état physique de la roche :

- degré d'altération,
- degré de fracturation,
- porosité,
- composition minérale.

D'après W.M. TELFORD (1983), le coefficient d'émanation d'un minéral augmente avec sa surface spécifique; dans le cas d'un grain, ce coefficient est fonction du rapport de la surface du grain sur le volume de celui-ci.

Toujours selon cet auteur, le coefficient de diffusion dans une roche est de l'ordre de  $10^{-20}$ , ceci pour la plus grande partie des cas. Cependant les facteurs déjà cités influent beaucoup mais les relations sont alors très complexes.

#### 2.2.2.2. Diffusion et transport

Chacun de ces phénomènes peut agir seul ou conjugué avec l'autre. Leur action peut être importante.

Dans le cas de la diffusion, on assiste au déplacement des atomes de Radon qui migrent au sein des fluides présents dans les pores et fractures de la roche. Le principal facteur est ici le gradient de concentration.

Le mécanisme de la diffusion est commandé par la loi de Fick

$$J = -D \frac{dC}{dz}$$

avec : J = flux de Radon  
D = coefficient de diffusion  
C = concentration en Radon  
Z = profondeur

Dans un sol supposé homogène, lorsque la diffusion agit seule, la concentration en Radon répond à la loi suivante :

$$C_p = C_\infty \cdot \exp\left[(-\lambda/D)^{1/2} \cdot Z\right]$$

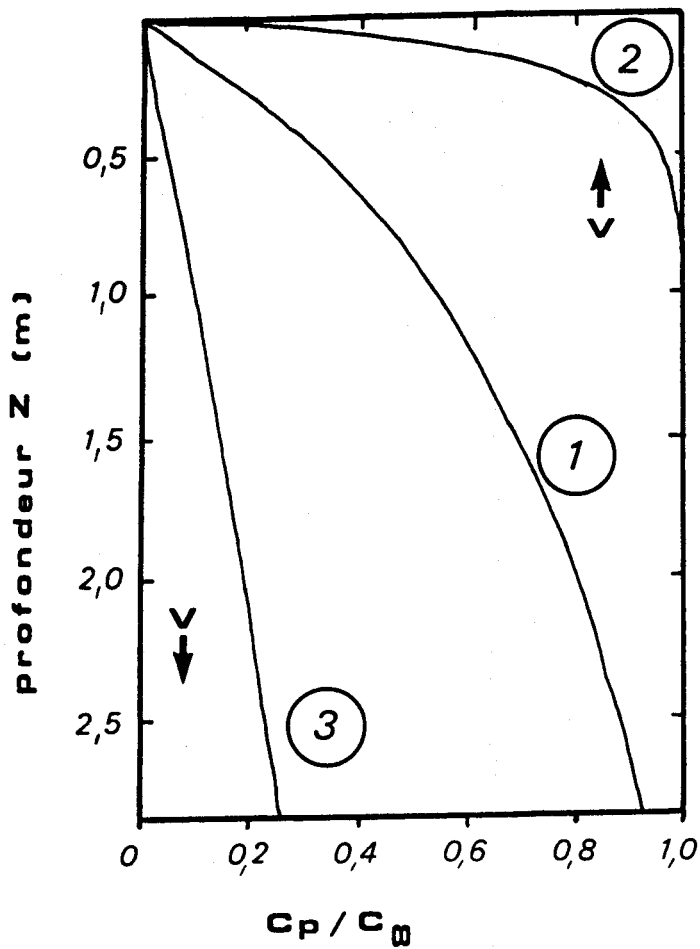
avec :  $C_p$  = concentration du Radon à la profondeur Z  
 $C_\infty$  = concentration à une profondeur supérieure à plusieurs longueurs de diffusion  $l = \sqrt{\lambda / D}$   
 $\lambda$  = constante de désintégration du Radon  
D = coefficient de diffusion du Rn dans le milieu

Cette équation est celle de la courbe 1 de la figure 9 (d'après SCHROEDER et al, 1965).

Lorsque le milieu étudié est poreux, fissuré, le transport est prédominant. C'est un transport par convection : le fluide se meut dans les interstices et entraîne avec lui le Rn présent

La loi de base du mouvement est la loi de Darcy :

$$V = -K i$$



$D = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$   
 $V = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$   
 $\epsilon = 0,25$   
 $\lambda = 2,11 \cdot 10^{-6}$

Fig. 9 : Concentration relative du Radon dans le sol en fonction de la profondeur pour 3 vitesses de circulation. (d'après Schroeder et al., 1965 )

avec :  $V$  = vitesse de filtration  
 $K$  = coefficient de perméabilité relative  
 $i$  = gradient de la charge hydraulique

Si la diffusion était limitée, par son essence, aux premiers mètres sous la surface du sol, le transport peut emmener les émanations à plusieurs centaines de mètres de leur source.

Les fluides interstitiels peuvent à l'évidence avoir deux comportements simples :

- . un mouvement ascendant,
- . un mouvement descendant.

Dans les deux cas, l'expression de la concentration à une profondeur  $Z$  devient plus complexe.

$$C_p = C_0 \left[ 1 - \exp \left[ \left( \frac{V}{2} D \xi - \left( \frac{V^2}{4D^2 \xi^2} + \lambda/D \right)^{1/2} \cdot Z \right) \right] \right]$$

avec  $V$  = vitesse de circulation des fluides intersticiels

$D$  = coefficient de diffusion dans le milieu étudié

$\xi$  = porosité du milieu

$\lambda$  = constante de désintégration du Radon

$Z$  = profondeur (en m)

En figure 9, les courbes 2 et 3 illustrent les 2 possibilités de mouvement. La courbe 2 illustre le déplacement de la courbe 1 pour des fluides ascendants, la courbe 3 pour des fluides descendants.

En règle générale, un déplacement par rapport à la courbe d'équilibre 1 indique un mouvement des fluides intersticiels.

Pour conclure ce paragraphe, il reste à préciser que le modèle, dont j'ai brossé les grandes lignes, s'applique dans le cas d'une source Radon régulièrement répartie dans un sédiment. Dans le cas d'une source ponctuelle, il est clair qu'un gradient de concentration en Radon va s'établir à partir du point d'émanation. Les auréoles d'isoconcentration seront tributaires des conditions de migration dans le milieu. Un travail de cartographie détaillée est ici indispensable pour tenter de mettre en évidence le point d'origine des émanations de Radon.

### 2.2.3. LES MODES DE DETECTION DU RADON

#### 2.2.3.1. Introduction

Ils sont nombreux. Je rappelle ici brièvement le principe de quelques uns. Je décris ceux que j'ai utilisés en 2ème partie dans les Chapitres II et III. Il y a deux façons d'aborder le problème :

- soit d'une manière très précise et très rigoureuse ainsi que font les organismes de surveillance des rayons ionisants (le S.C.P.R.I. en France ou le Ministère de la Santé Publique en Belgique ; voir 2ème partie, Chapitre III);
- soit de façon qualitative dans le cadre d'une prospection. Ceci nécessite des techniques fiables et souples d'emploi.

Dans ces techniques de terrain, on distingue :

- d'une part, celles visant à détecter le Radon dans les sols et celles le faisant dans les eaux naturelles;
- d'autre part, les techniques de mesures instantanées de celles qui nécessitent un temps d'intégration (CHARLET *et al.*, 1981).

### 2.2.3.2. Détection du Radon dans les sols

#### a) Méthodes de mesures instantanées

Les plus courantes sont basées sur la mesure de la teneur en Radon d'un certain volume de gaz. Ceci peut se faire soit directement sur le terrain grâce à des flacons scintillants au sulfure de zinc. C'est le principe de l'émanomètre. Ce mode de mesure est simple à mettre en oeuvre, pratique pour la reconnaissance rapide de zones d'intérêt. Son inconvénient principal est que ce type de mesure est largement tributaire des facteurs météorologiques.

Dans le cas de l'emploi d'une chambre d'ionisation, la mesure se fait en laboratoire. Le gaz a été préalablement prélevé dans des flacons sous vide. L'emploi *in situ* d'un tel type de mode de mesure ne se fait que dans des conditions particulières (prévisions de séismes ...)

#### b) Méthodes de mesures intégrées

Elles sont de deux grands types : l'évaluation des concentrations en Radon peut se faire par celle des dégats causés sur un support par les radiations ou par celle d'un dépôt effectué sur un autre type de support.

Les détecteurs solides de traces alpha entrent dans la première catégorie . Ce sont des films sensibles aux émissions alpha (Kodak LR 115, C.R. 39). Après un temps d'exposition sur le site (de quelques heures à plusieurs semaines) ces films sont révélés, les impacts sont alors dénombrés. Si l'implantation et le traitement chimique des films est simple leur dépouillement est long et fastidieux.

Dans cette catégorie de détecteur entrent aussi les produits thermoluminescents artificiels. Ils utilisent l'effet cumulatif du rayonnement sur le piégeage des porteurs de charge dans la structure électronique de certains matériaux. Les propriétés lumineuses initiales de ceux-ci étant connues, il est possible d'en mesurer les variations. Ce type de matériel reste assez peu utilisé.

Le second type de détecteur est basé sur l'absorption ou l'adsorption du Radon et/ou de ses descendants sur un support. Il est encore possible d'introduire ici une distinction entre les détecteurs selon que le rayonnement analysé est alpha ou gamma.

Les alphacards (produits par Alpha Nuclear) utilisent une technique



d'absorption des descendants solides du Radon, émetteurs alpha. Leur temps d'intégration varie de quelques heures à quelques jours. La lecture peut se faire directement sur le terrain en introduisant les cartes dans un lecteur électronique.

Les détecteurs au charbon actif sont basés, eux, sur l'absorption des gaz du sol par un charbon actif. Les mesures de teneur en Radon se font par le biais des descendants solides émetteurs de rayonnement gamma ( $^{214}\text{Pb}$  et  $^{214}\text{Bi}$ ). Les détecteurs que j'ai utilisé sont de type Boukoal mis au point à la F.P.Ms\*. Le principe d'implantation est simple (2ème partie Chapitre II). Après un temps d'intégration de l'ordre de 15 jours, établi en fonction de la durée du temps de mise en équilibre du Radon et de ses descendants, le détecteur est récupéré et analysé en spectrométrie gamma. Cette dernière opération est tout à fait réalisable sur le terrain. Cette méthode présente l'avantage d'utiliser des matériaux peu onéreux, des temps de dépouillement rapides (comptages de 400 sec.) et des installations légères (aisément transportables).

#### 2.2.3.3. Détection du Radon dans les eaux naturelles

Ce type de mesure est moins courant en prospection; il est cependant tout aussi intéressant. De même que dans les sols on peut distinguer les mesures instantanées et les mesures intégrées.

##### a) Méthodes de mesures instantanées

J'en citerai deux. La première, classique, citée par R. POCHET (1982) consiste à dégager par barbottage un échantillon d'eau et à conduire les gaz ainsi extraits dans un scintillateur. La seconde, que j'ai appliquée (2ème partie, Chapitre II et III) est basée sur la propriété qu'ont les liquides organiques de dissoudre le Radon plus facilement que l'eau. Il est facile, par simple agitation d'un mélange des 2 phases d'extraire le Radon contenu dans un échantillon d'eau. Le dosage se fait ensuite en spectrométrie gamma de la même façon que pour un boukoal. Les avantages pratiques sont d'ailleurs similaires pour les 2 types de détecteur.

##### b) Méthodes de mesures intégrées

Dans le cas de l'eau, elles sont assez peu usitées. R. POCHET (1982)

---

\* Faculté Polytechnique de Mons (Belgique).

propose une technique basée sur un échange de Radon (ou d'Hélium) d'une phase à une autre. Sa technique applicable sur une verticale préconise l'emploi d'une série de "saucisses" pleines d'un fluide quelconque. Cette "verticale" placée dans un milieu pendant 24 à 48 heures permet d'étudier les concentrations en profondeur dans l'eau ou dans des sols non consolidés saturés en eau.

#### 2.2.3.4. Les choix des méthodes

J'ai utilisé en détection Radon, 3 types de méthodes :

. 2 méthodes instantanées :

- l'émanométrie,
- la concentration par un liquide organique (Toluène).

. 1 méthode intégrée : les charbons actifs.

Dans les trois cas, j'ai été intéressé par la simplicité de mise en oeuvre et le dépouillement rapide des résultats. De plus, visant à établir un système de prospection, le fait de pouvoir utiliser ces trois méthodes sur le terrain et/ou en camp de base, a été primordial dans le choix.

#### 2.2.4. INFLUENCES CLIMATOLOGIQUES

Divers auteurs (KLUSHMAN *et al*, 1981; ODDOU, 1981 et 1983; SEIDEL, 1982) dont la vocation est d'étudier la prévision de séismes à partir des émissions gazeuses (Radon ou autre) se sont heurtés aux problèmes dus à l'action des phénomènes climatologiques. Pour ma part, j'ai aussi enregistré des fluctuations qui semblent être liées à ces facteurs (2ème partie, Chapitre III).

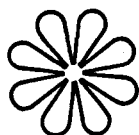
Pour en revenir aux données de la bibliographie d'une part, celle-ci est encore assez peu riche, d'autre part, elle offre avant tout des ébauches de travaux à poursuivre.

SEIDEL (1982) constate que la concentration en Radon et la pression atmosphérique varient ensemble, pour KLUSHMANN *et al* (1981) la relation est inverse ou peu évidente pour ODDOU (1981).

Pour SEIDEL, la relation avec l'eau (précipitations ou hygrométrie de l'air) la relation est inverse et significative. Pour KLUSHMAN *et al* l'humidité n'influe pas sur l'émanation, c'est au paramètre saisonnier

sans signification dans ce cas. Pour ODDOU , la relation n'est pas évidente. Pour ce dernier, la relation avec la température peut être bonne, alors que rien n'est évident pour SEIDEL.

Je pourrais continuer ainsi mon énumération mais il me paraît clair que rien de précis ne sort de ces travaux. Leur trait commun est qu'ils sont tous réalisés sur des cas particuliers et qu'ils ne prétendent pas à la généralisation. Ce qui est certain, ces auteurs le montrent clairement, c'est qu'à un niveau ou à un autre, les conditions météorologiques influent sur les émanations de Radon ou sur leur détection. Je présente, en 2ème partie, Chapitre III, mes observations et tentatives d'interprétation à ce niveau.



## CHAPITRE III

PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE





## CHAPITRE III.- PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE

### 3.1. LOCALISATION ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

#### 3.1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le domaine d'étude, la région de Vresse-Oizy, est situé en Ardenne belge (fig. 10). On peut tenter de définir cette région en opposant plateaux et vallées. Les premiers, survivance de la pénéplaine post-hercynienne, n'offrent que peu d'affleurement; les secondes, très encaissées offriraient aux géologues de très belles coupes si elles n'étaient pas le plus souvent masquées par la forêt ardennaise.

La région qui fait l'objet de ce mémoire est située à l'Est du massif de Rocroi, au Nord de Charleville (fig. 10). Elle est parcourue par la Semois et ses affluents surimposés lors des mouvements épirogéniques mioplIOCènes (G. WATERLOT, 1945).

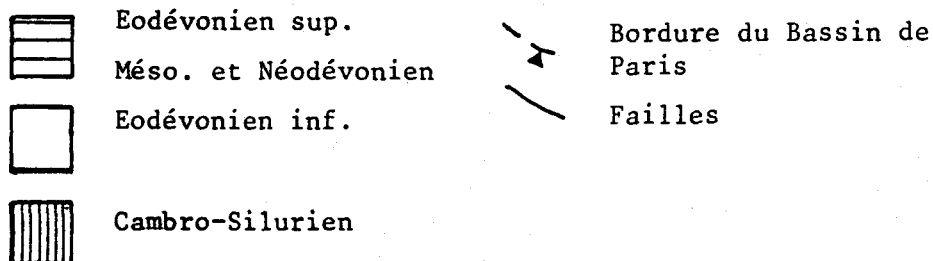
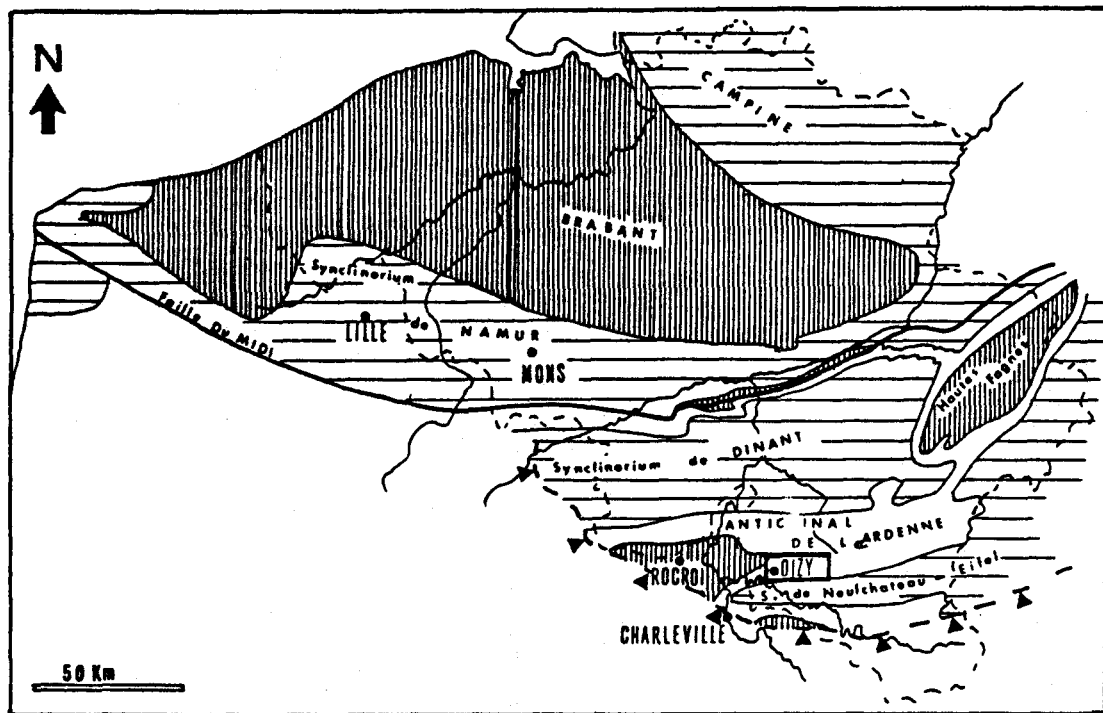
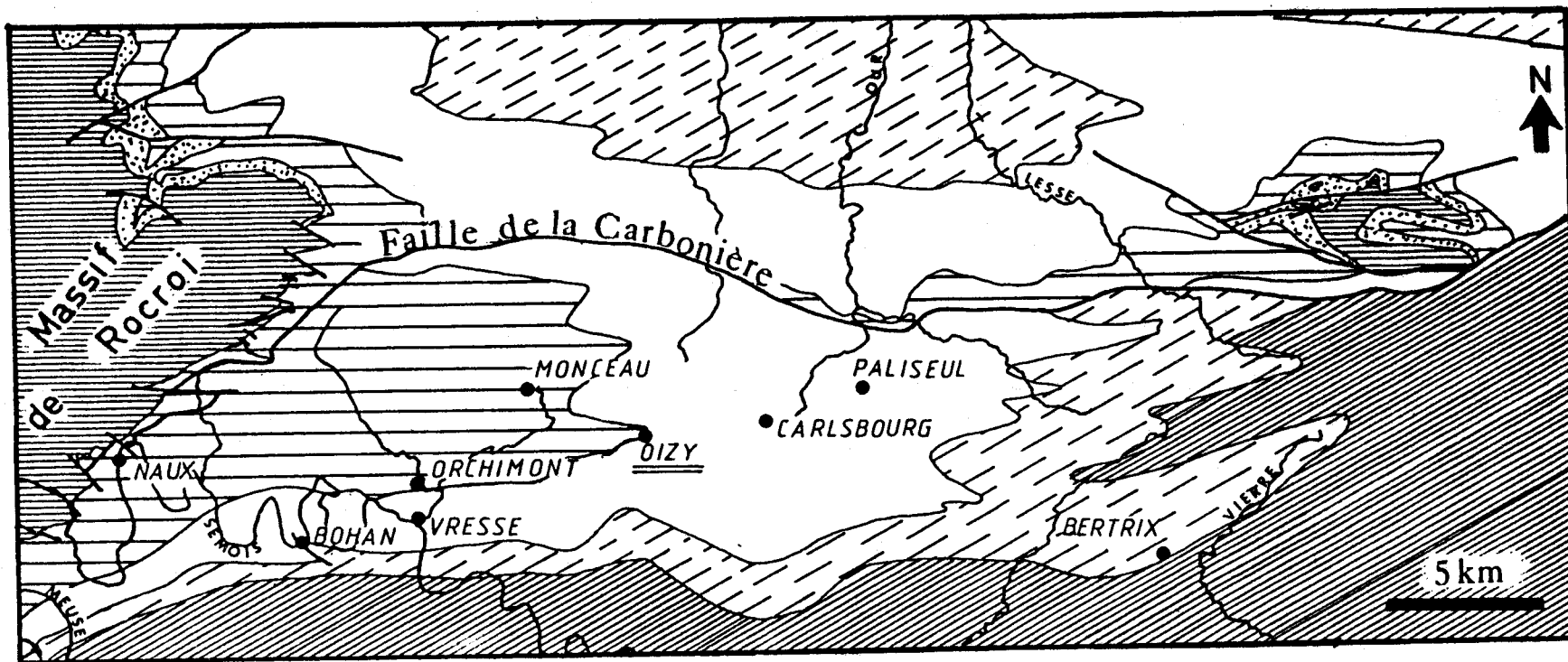


FIG. 10: Situation du domaine d'étude, grands traits structuraux du Paléozoïque belge. d'après P.MICHOT (1980)



BU  
LILLE

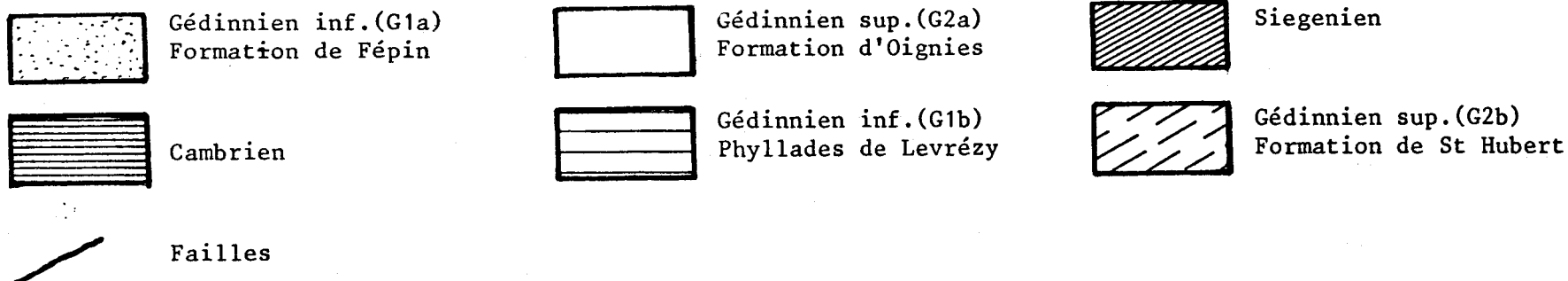


FIG. 11 : CARTE GEOLOGIQUE DE L'ANTICLINAL DE L'ARDENNE  
d'après A. BEUGNIES (1982)

### 3.1.2. LE CONTEXTE GEOLOGIQUE

#### 3.1.2.1. Le cadre général : l'Ardenne

Le secteur, objet de la prospection dont les résultats vont être exposés dans ce mémoire, appartient à la partie méridionale de l'Ardenne. Cet ensemble de terrains paléozoïques constitue la partie occidentale du massif schisteux rhénan avec lequel il est en communication par l'"isthme du Luxembourg" (G. WATERLOT, 1973).

La structure générale de l'Ardenne est constituée d'une succession d'aires anticlinales et synclinales à vergence Nord qui peuvent ou non se chevaucher à la faveur de failles d'importance variable. L'aspect actuel de l'Ardenne est dû, pour l'essentiel, à la tectonique hercynienne qui a, d'une part, repris les massifs calédoniens (G. WATERLOT, 1945; A. BEUGNIES, 1961, 1963) et, d'autre part, donné leurs structures actuelles aux terrains dévonocarbonifères.

Le secteur étudié est situé dans la zone anticlinale de l'Ardenne (fig. 10) immédiatement à l'Est du Massif de Rocroi, dans le compartiment de Carlsbourg (A. BEUGNIES, 1982) (fig. 11). Pour la région qui nous intéresse les terrains qui affleurent appartiennent au Gédinnien inférieur.

#### 3.1.2.2. Généralités sur l'Eodévonien de l'Ardenne

L'Eodévonien de l'Ardenne est classiquement considéré comme une période de transgression de la mer sur le continent calédonien (fig. 12) (J. GOSSELET 1888; G. WATERLOT, 1945; E. ASSELBERGHS, 1946, 1954). La progression de la mer s'est effectuée en gros du Sud vers le Nord. Elle envahit des bassins épicontinentaux subsidents, ce qui favorise l'accumulation d'importantes séries détritiques. Dans le bassin de Neufchâteau, on a 2200 m de dépôts pour le seul Gédinnien (G. WATERLOT, 1973). Ces sédiments ont un caractère détritique, arénacé très accusé, typique d'un milieu épicontinental. La mer borde un continent qui constitue une source de matériel détritique issu de la dégradation de la chaîne calédonienne.

Selon ASSELBERGHS (1946, 1954), la transgression s'est effectuée sur un fond plat, sous une faible tranche d'eau. La mer paraît avoir eu des marées de forte amplitude, ce qui explique l'association des faciès néritiques et des importants dépôts littoraux observés.

L'existence de faciès rouges ou bigarrés, assises d'Oignies et de St Hubert du Gédinnien supérieur illustre par leur caractère continental (lagu-



no-lacustre) les tendances régressives de certaines parties du Gédinnien et par conséquent, traduit les hésitations de la transgression.

En résumé, la transgression ardennaise atteint le Condroz, ou ride bollandienne (fig. 12) au Gédinnien inférieur, elle ne le dépassera qu'au cours du Gédinnien supérieur envahissant le bassin campinois jusqu'à la régression emsienne (P. MICHOT, 1980).

### 3.2 . LES DONNEES GEOLOGIQUES DU DOMAINE D'ETUDE

Le secteur étudié étant au coeur de l'anticlinal de Bastogne-Paliseul (fig. 11), j'exposerai dans ce paragraphe les généralités sur la stratigraphie, la structure de ces terrains ainsi que sur leur évolution post-paléozoïque.

#### 3.2.1. STRATIGRAPHIE DU GEDINNIEN

##### 3.2.1.1. Introduction

Les anomalies d'Oizy sont situées stratigraphiquement dans des couches du Gédinnien. Cet étage est classiquement divisé en Gédinnien inférieur ( $G_1$ ) et supérieur ( $G_2$ ).

Dans mon travail, je me suis appuyé sur les études d'E. ASSELBERGHS (1946, 1954) et de A. BEUGNIES (1982).

##### 3.2.1.2. Stratigraphie du Gédinnien inférieur ( $G_1$ )

La figure 13 présente une synthèse des données bibliographiques utilisées ainsi que des observations de terrains.

Le Gédinnien inférieur comporte deux parties. La première est le Gédinnien basal ( $G_{1a}$ ) ou Formation de Fépin (F. MEILLIEZ, 1983). Si on se réfère aux travaux récents de cet auteur, on peut déterminer, dans cette formation trois lithozones. L'analyse de F. MEILLIEZ implique que la Formation de Fépin marque une ligne de rivage instable où les influences marines et alluviales interfèrent ce qui expliquerait la complexité des lithozones.

En figure 14, on trouvera la colonne lithostratigraphique pouvant figurer le  $G_{1a}$  pour le secteur étudié. La puissance de la formation n'excède pas 50 m.

La seconde partie du Gédinnien inférieur, la plus importante en épaisseur, est représentée dans cette région par la Formation de Levrézy ( $G_{1b}$ ) (équivalent dans l'Ardenne méridionale des schistes de Mondrepuits). Dans la vallée de la Meuse, les phyllades de Levrézy ont une puissance de l'ordre

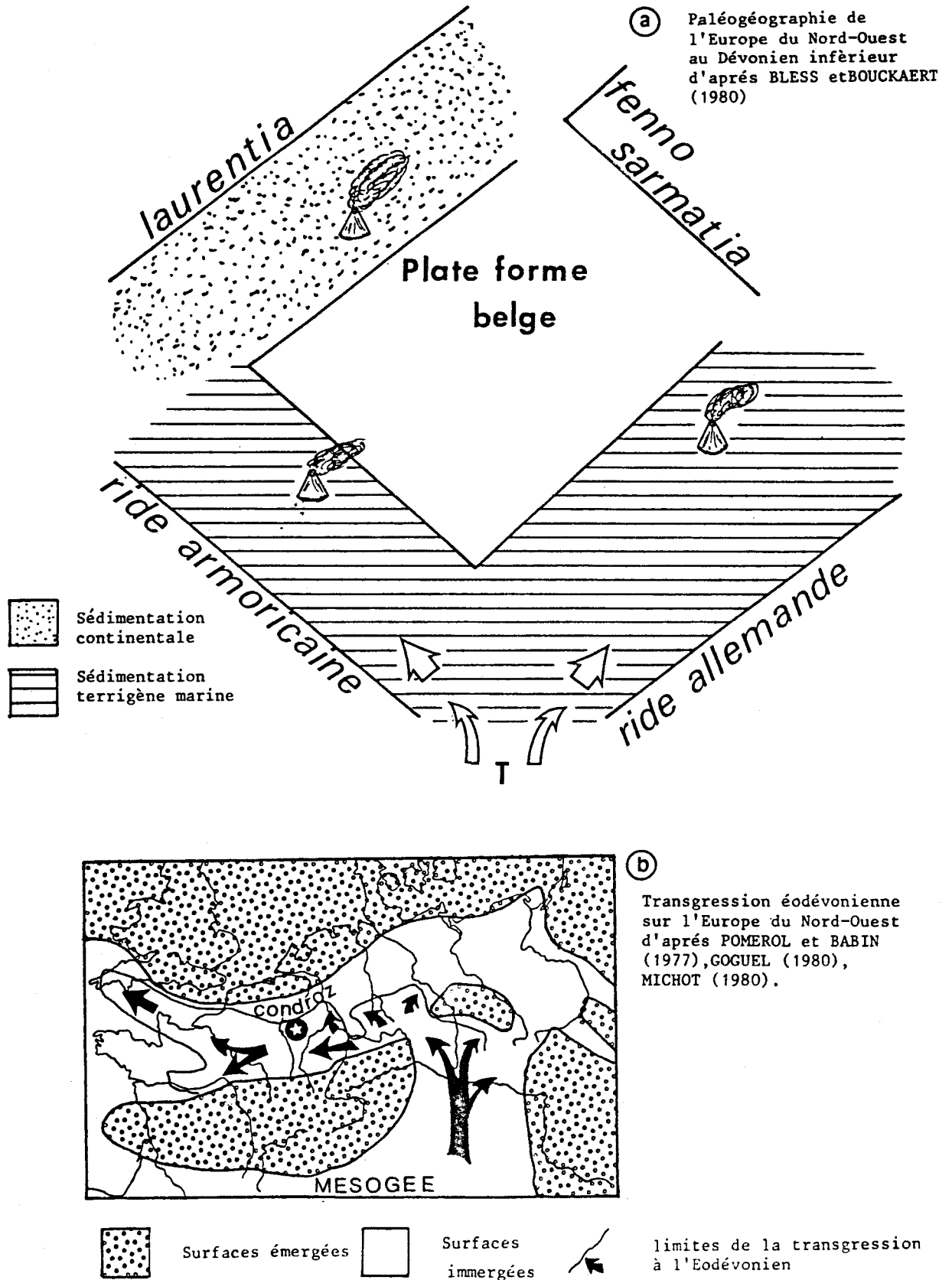


Fig. 12 : Paléogéographie de l'Europe du Nord-Ouest au Dévonien

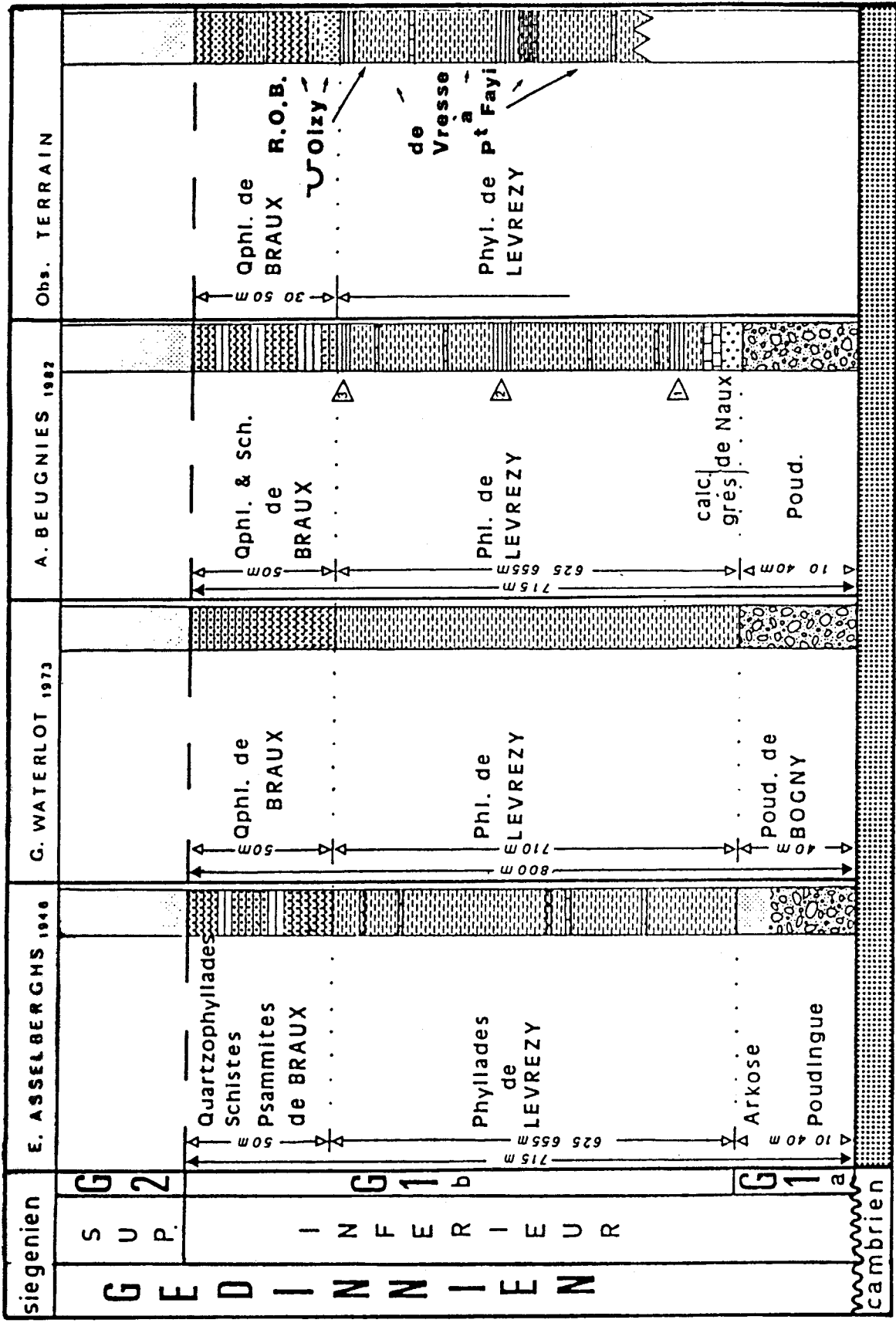


Fig. 13 : Lithostratigraphie du Gédinnien inférieur

de 700 m (ASSELBERGHS, 1946). Cette épaisseur diminue lorsqu'on s'éloigne vers l'Est pour n'être plus que de 200 m au Nord-Ouest du Massif du Serpont (fig. 11 & 15). Le Gédinnien inférieur disparaît totalement un peu plus à l'Est.

La figure 13 indique que la Formation de Levrézy est avant tout caractérisée par les phyllades du même nom. Ces roches sont toujours micacées et gréseuses. Ceci marque la permanence du caractère détritique de la série. Lorsque la tendance détritique est un peu plus marquée, des quartzophyllades et même des quartzites peuvent apparaître.

D'une façon générale la série est très monotone, seule l'existence de quelques horizons particuliers permettent d'établir une échelle lithostratigraphique.

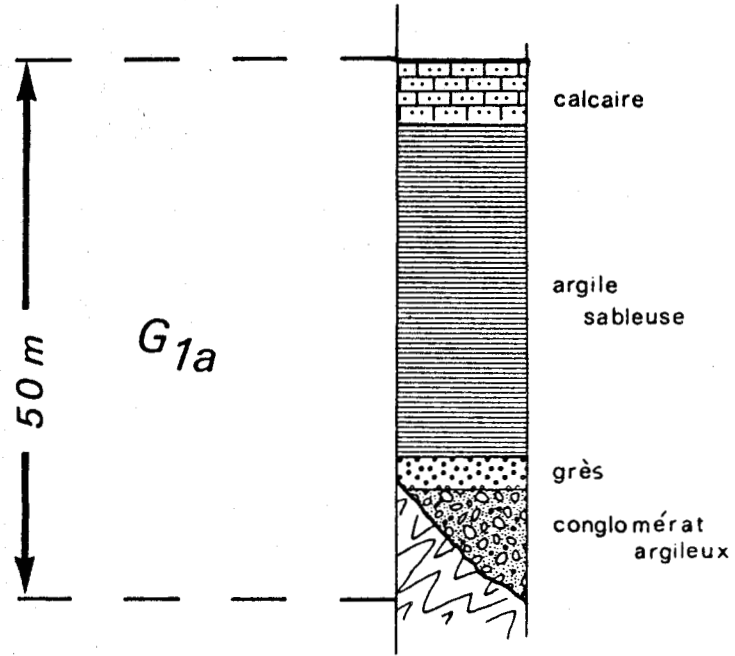
A. BEUGNIES (1982) distingue notamment trois horizons de 10 à 20 m de puissance, notés 1, 2 et 3 en figure 13, ces horizons sont plus fins, moins arénacés que le reste de la formation. Il signale par ailleurs l'existence de niveaux calcaires, nodulaires, crinoïdiques. Il convient surtout de noter, j'en parlerai souvent par la suite, l'existence au sommet de la série d'un horizon quartzophylladeux au sein duquel on rencontre plusieurs bancs métriques de grès à ciment argileux : les quartzophyllades de Braux. Cet horizon a une cinquantaine de mètres de puissance dans la vallée de la Meuse, il s'amenuise vers l'Est comme l'ensemble du  $G_1$  et n'a plus qu'environ 30 mètres de puissance près d'Oizy.

Ce faciès marque le sommet du  $G_{1b}$  et aussi l'amorce de la tendance régressive des couches du Gédinnien supérieur. La teinte des roches change. On passe du bleuté des phyllades de Levrézy à un gris vert. Les grès montrent de belles stratifications entrecroisées, soulignées de matière organique (voir 3ème partie, Chap.III).

### 3.2.1.3. Stratigraphie du Gédinnien supérieur ( $G_2$ )

J'exposerai plus rapidement quelques généralités sur la stratigraphie du Gédinnien supérieur. En effet, dans mon étude, je me suis surtout intéressé aux couches inférieures du Gédinnien.

Le  $G_2$  est constitué par deux formations : celle d'Oignies ( $G_{2a}$ ) et celle de St Hubert ( $G_{2b}$ ).



FORMATION de FEPIN à NAUX

F. Meilliez (1983)

FIGURE 14

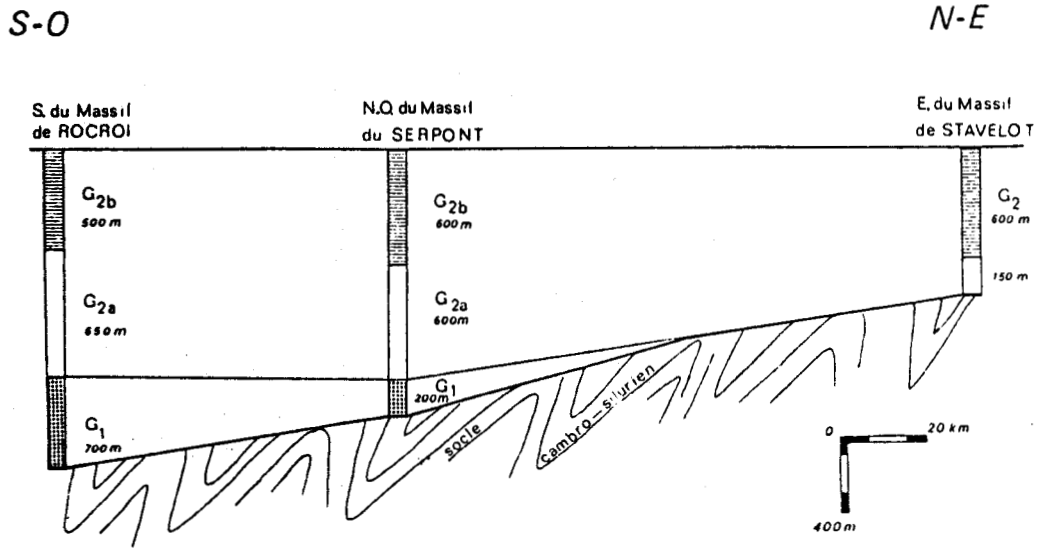


FIG. 15: Schématisation de la disparition du Gédinnien inférieur à l'Est du massif du Serpont d'après E.Asselberghs (1946).

La formation d'Oignies, dans la région qui nous intéresse, est essentiellement formée de phyllades à nodules carbonatés, fréquemment décalcifiés. Ils alternent avec des bancs métriques à plurimétriques de quartzites micacés ou d'arkoses. Récemment (1984), A. BEUGNIES a distingué au sein de ces roches, des feldspaths de différents types. Notamment, il évoque la présence d'albites de haute température. Leur origine pouvant être volcanique, ceci amènerait à considérer ces horizons comme étant de type volcano-détritique. On peut ainsi penser que des manifestations volcaniques ont existé durant cette période (A. BEUGNIES, 1984).

Hors des zones métamorphiques, les roches sont bigarrées, vertes et rouges; quand le métamorphisme les atteint les mêmes roches sont alors uniformément vertes (E. ASSELBERGHS, 1946; A. BEUGNIES, 1982). La puissance de cette formation est de l'ordre de 650 m ( fig. 15) au Sud de Rocroi.

La formation de St Hubert ( $G_2b$ ), dans la zone qui nous intéresse, se présente sous le "faciès de Laforêt". Les phyllades y sont là encore prépondérantes, leur teinte varie du vert au bleu. La puissance est de l'ordre de 500 m (fig. 15). Si on se réfère aux divers auteurs déjà cités, on peut voir dans les formations du Gédinnien supérieur l'écho d'une tendance régressive.

### 3.2.2. LES GRANDS TRAITES STRUCTURAUX DU DOMAINE D'ETUDE

#### 3.2.2.1. Généralités

L'Ardenne est le faisceau belge de l'orogène varisque. En Belgique, les déformations hercyniennes sont datées du Westphalien supérieur (G. WATERLOT, 1945). La phase asturienne induit un plissement à vergence Nord impliquant tous les terrains paléozoïques belges. La déformation a été plus tardive dans le Nord que dans le Sud.

Aucun autre mouvement orogénique important n'ayant affecté l'Ardenne depuis cette époque, les terrains ont actuellement la forme acquise lors de l'orogénèse varisque. D'après P. MICHOT (1980), un resserrement crustal est à l'origine de l'orogène varisque. Celui-ci de vergence Nord a amené la formation d'une succession d'aires anticlinales et synclinales.

Ces synclinoriums et anticlinoriums sont globalement orientés W-E (fig. 10).

Le secteur d'étude, la région de Vresse-Oizy, appartient à la zone anticlinale de l'Ardenne (fig. 10 et fig. 11). A. BEUGNIES ayant récemment (1982) publié les résultats d'une étude sur cette région, je me suis assez largement appuyé sur ceux-ci, notamment pour la cartographie présentée.

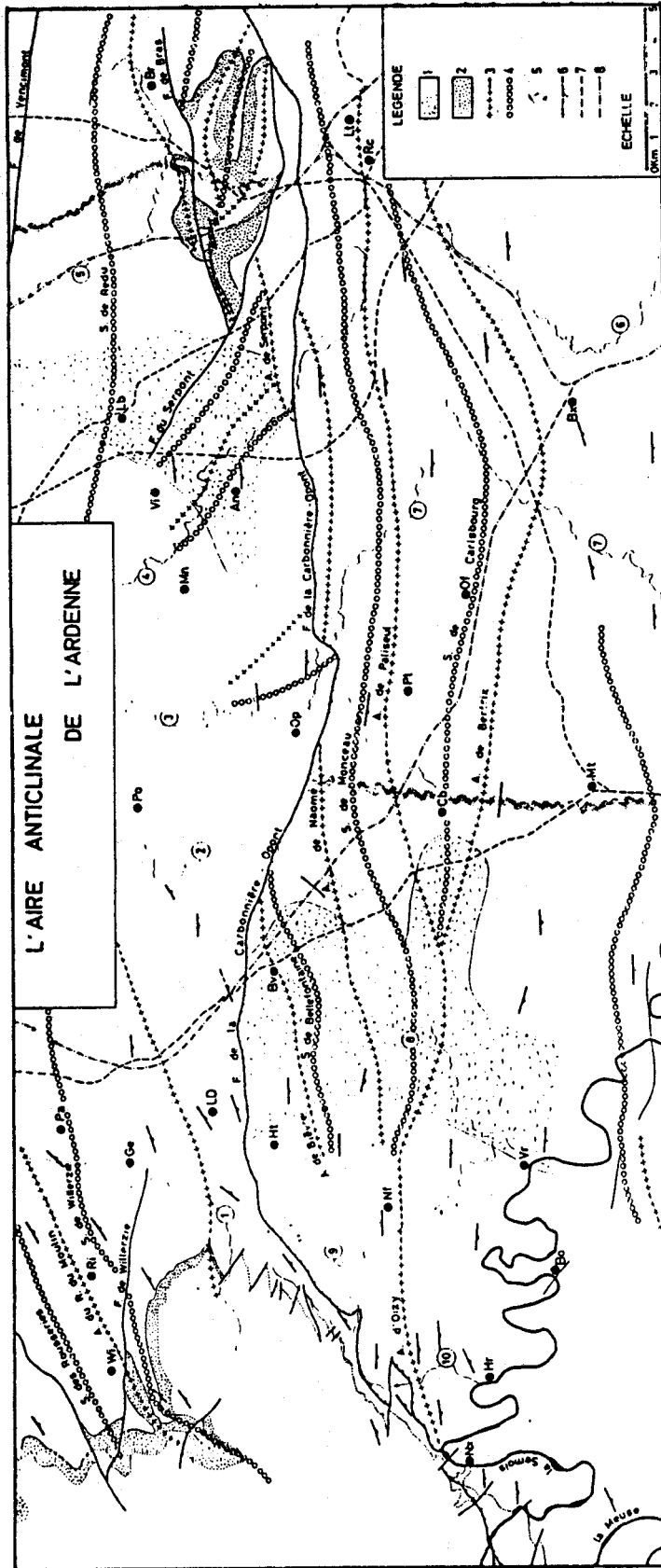


Fig. 16 — L'aire anticlinale de l'Ardenne. — Eléments structuraux.

Légende : 1, Zone d'extension du faciès conglomératique du niveau arkosique moyen de la formation d'Oignies (G2a).  
2, Gedinnien inférieur (G1a), formation du conglomérat de Fépin. — 3, Axe anticlinal. — 4, Axe synclinal. — 5, Axe  
de surélévation. — 6, Allure de la schistosité. — 7, Route principale. — 8, Ligne de chemin de fer.

(in A. Beugnies, 1982)

### 3.2.2.2. Les plis sur le terrain

L'aire anticlinale de l'Ardenne est affectée de 2 accidents majeurs :

- la faille de Vencimont,
- la faille de la Carbonière-Opont (A. BEUGNIES, 1982). (fig.11 et fig. 16)

Mon terrain d'étude est situé dans le compartiment de Carlsbourg, partie méridionale de l'aire anticlinale de l'Ardenne.

Les axes anticlinaux et synclinaux sont orientés Ouest-Est et les plis "très adoucis" ont des pendages de 20 à 50°N (fig. 17).

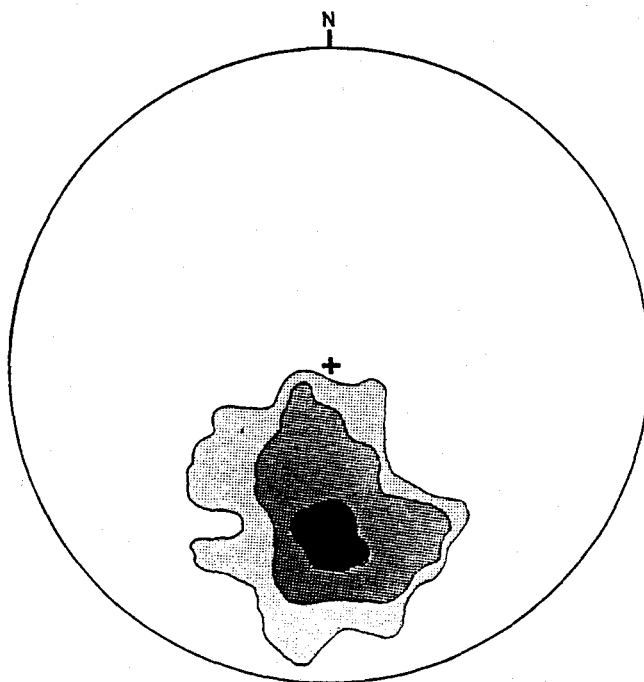


Fig. 17 : Stratification associée au plissement de l'axe anticlinal de l'Ardenne  
Stéréogramme réalisé sur 300 mesures.

Au cours de mon étude de terrain, j'ai distingué deux secteurs de travail :

- la partie occidentale : la région de Bohan-Orchimont-Vresse située sur le flanc sud de l'anticlinorium,
- la partie orientale : la région de Six Planes-Oizy-Monceau qui forme en gros la terminaison périclinale du Gédinnien inférieur.

#### a) La partie occidentale

La finalité de cette étude était de comprendre les anomalies radiométriques décelées lors de la prospection autoportée de l'Ardenne (CHARLET *et al.*, 1983) et éventuellement d'en déceler d'autres au cours de ma



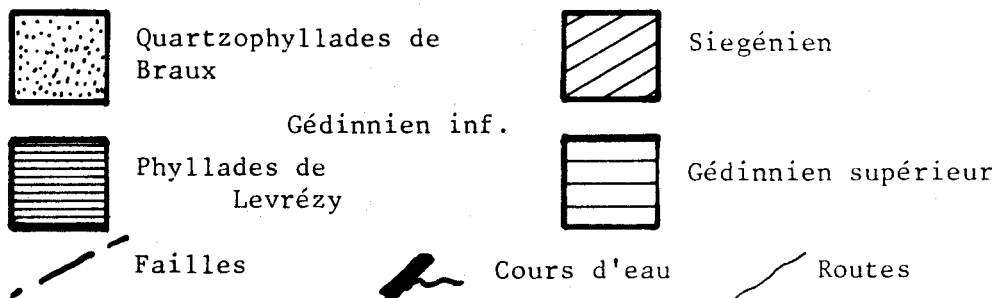
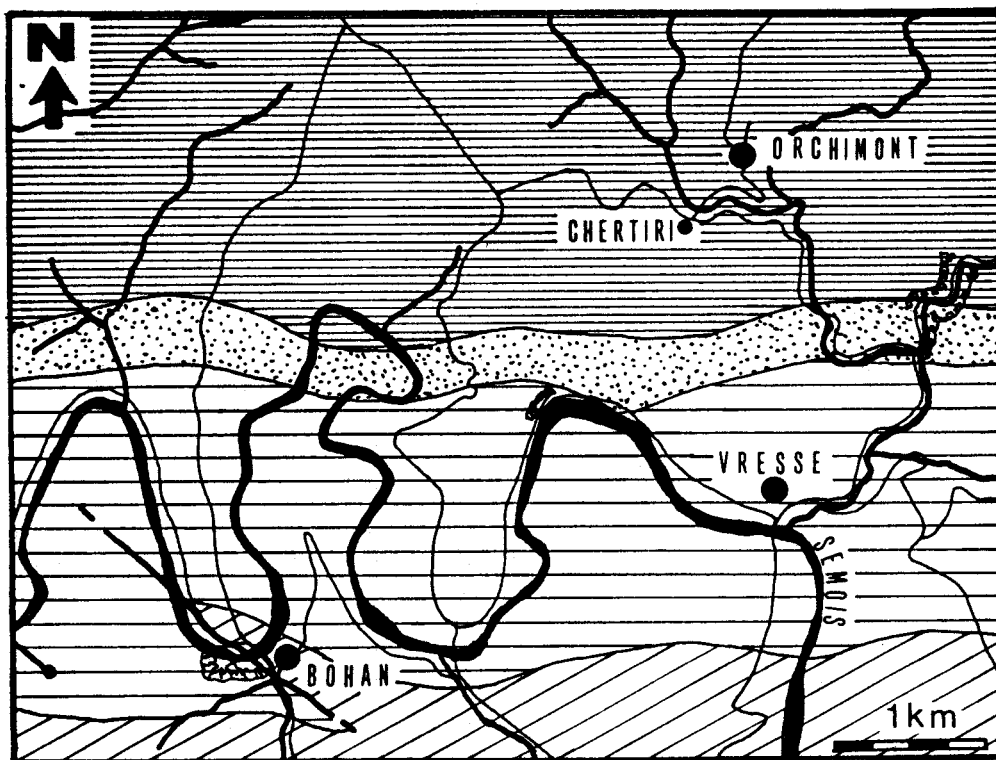
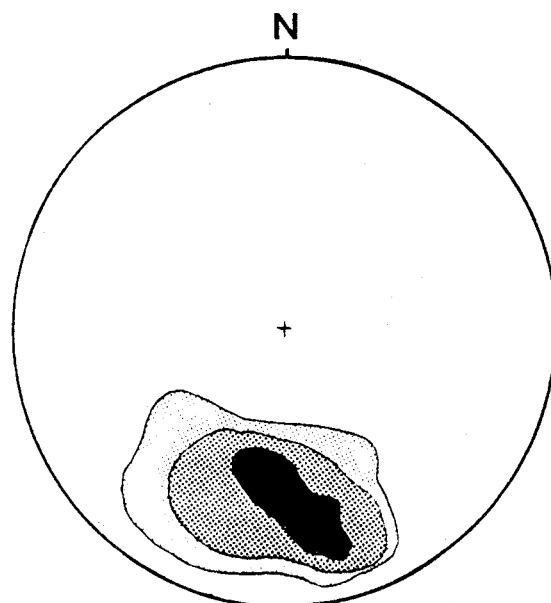


Fig. 18 : Carte géologique schématique de la région de Bohan-Orchimont d'après A. Beugnies et G. Waterlot (1965) et A. Beugnies (1982)

Fig. 19 : Stratification associée au plissement dans la partie occidentale du secteur d'étude. (180 mesures)



prospection scintillométrique pédestre. Cette dernière tout comme la prospection autoportée est restée stérile ou presque dans ce secteur. Seul un indice a été décelé à proximité de Chertiri, à 500 m au Sud-Ouest d'Orchumont (fig. 18 et fig. I hors texte).

Les mesures effectuées sur le terrain nous montrent une bonne concordance d'observation avec les faits énoncés par A. BEUGNIES. En figure 19 je présente un report stéréographique des mesures de pendage de la stratification afin de visualiser l'allure du plissement.

b) La partie orientale

Ce secteur a été largement parcouru, ceci est dû au fait que diverses anomalies ont été décelées en prospection : des anomalies en Uranium, des anomalies en Radon (fig. 20 et I hors texte).

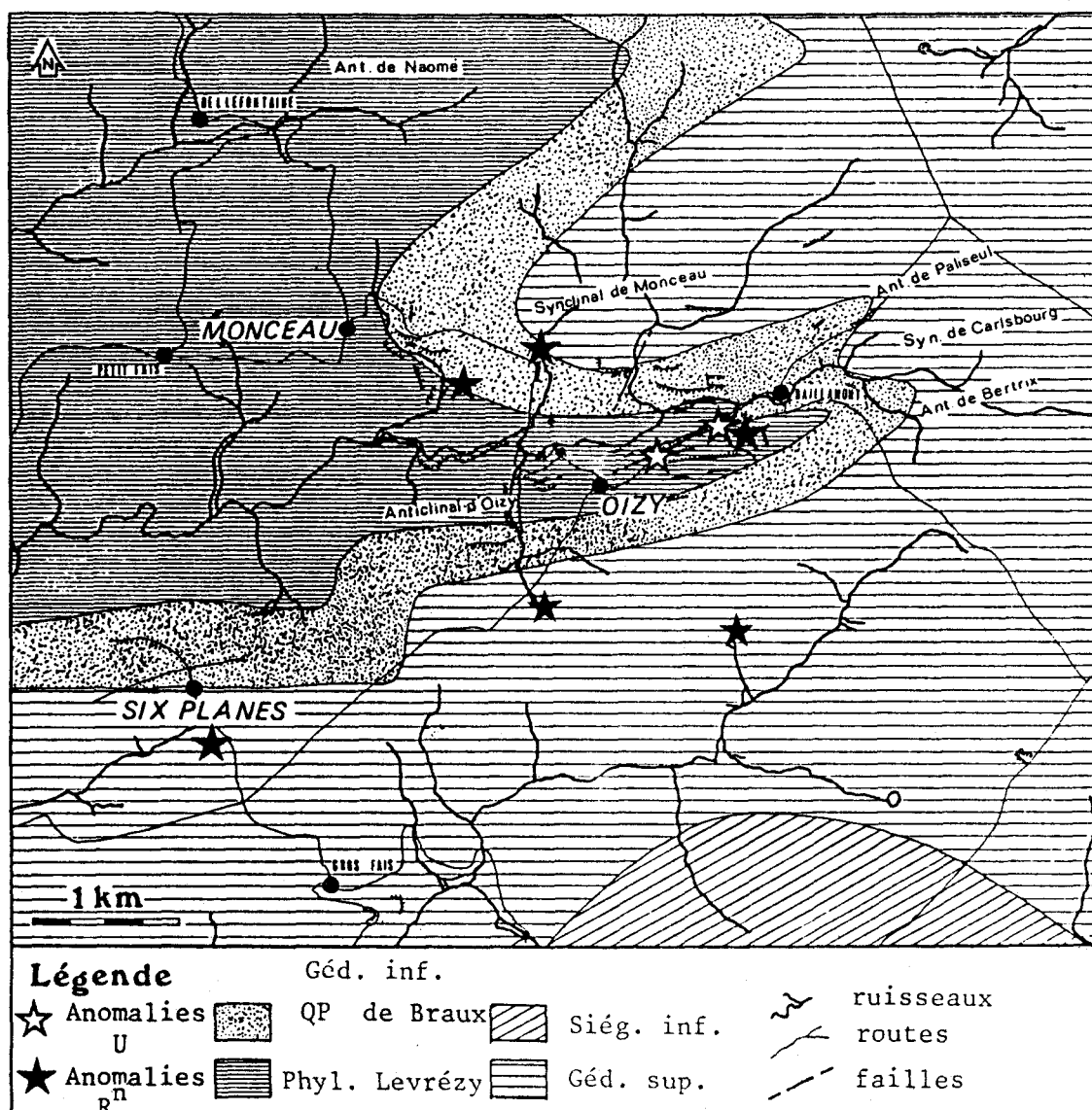


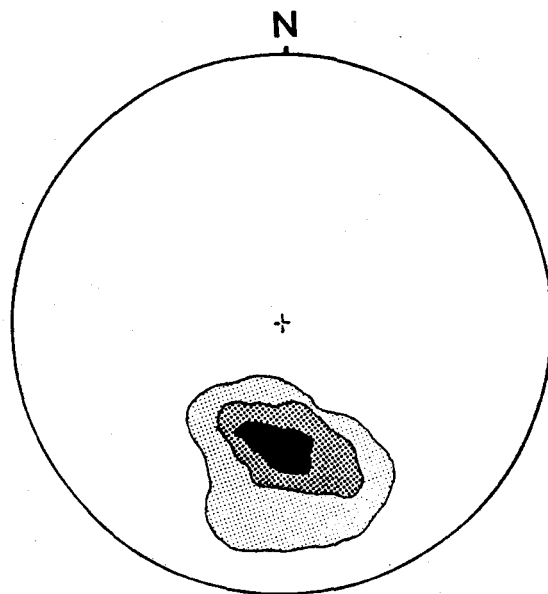
Fig.20 : Carte géologique schématique de la région Oizy-Monceau d'après A. Beugnies & G. Waterlot (1965) et A. Beugnies (1982)

La figure 20 ainsi que les cartes géologiques à plus grande échelle (fig.10 et fig. 11) nous indiquent que les terrains du Gédinnien inférieur ( $G_1$ ) s'ennoient sous les formations d'Oignies et St Hubert ( $G_2$ ) légèrement à l'Est d'Oizy.

L'anticlinal d'Oizy, un des plis principaux de l'aire anticlinale (A.BEUGNIES, 1982) se dichotomise en cet endroit, donnant ainsi naissance aux anticlinaux de Paliseul et de Bertrix (fig. 16 & 20). Ces derniers encadrent le synclinal de Carlsbourg. Immédiatement au Nord de l'anticlinal d'Oizy se trouve le synclinal de Monceau puis l'anticlinal de Naomé.

Les figures 20 et 21 illustrent l'orientation Ouest-Est de ces plis ainsi que leur vergence Nord. Ceci est établi classiquement pour une grande partie de l'Ardenne (G. WATERLOT, 1945; P. MICHOT, 1980; A. BEUGNIES, 1982).

Fig. 21 : Stratification associée au plissement dans la partie orientale du secteur d'étude. (150 mesures)



### 3.2.2.3. Les failles - La fracturation

J'ai déjà évoqué, dans le paragraphe précédent, l'existence des grands accidents qui affectent la région étudiée. De l'étude récente de A.BEUGNIES (1982), il ressort que la faille de la Carbonière-Opont (fig. 16), est un accident majeur à l'échelle de l'Ardenne.

Cette faille d'âge hercynien est en fait un coulissage dextre dont l'amplitude atteint une vingtaine de kilomètres. Cet accident serait dû à une phase de l'orogénèse hercynienne caractérisée par des translations de direction Est-Ouest (J.P. COLBEAUX, 1977; A. BEUGNIES, 1982).

Les anomalies radiométriques décelées dans le compartiment de Carlsbourg sont à mettre en relation avec des fractures à remplissage limonitique. De ce fait, j'ai été amené à étudier la fracturation sur le terrain et à tenter de la mettre en relation avec les données régionales de la bibliographie, notamment les travaux de COLBEAUX (1974, 1977).

a) la partie occidentale

En dehors de la faille de Bohan (fig. 18), ce secteur présente peu d'accidents importants. Comme de plus, la prospection n'a livré que peu d'anomalies, je ne m'étendrai pas beaucoup sur le résultats.

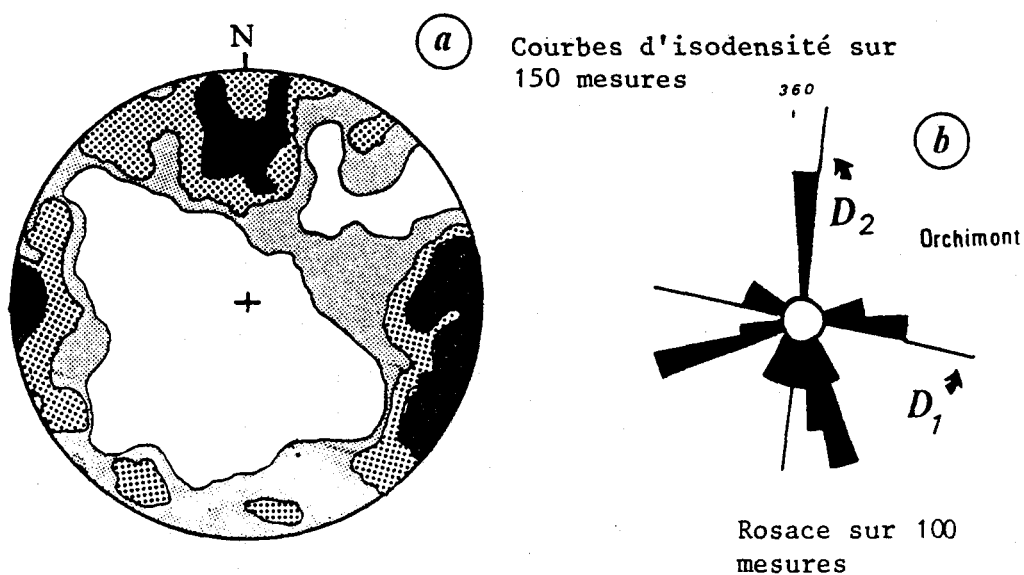


Fig. 22 :Orchimont : directions de fracturation a stéréogramme  
b rosace

L'étude de la fracturation sur le terrain me permet de mettre en évidence 2 directions principales (fig.22 a et b)  $D_1$  et  $D_2$ .

Ces directions semblent correspondre à celles mises en évidence dans les terrains paléozoïques du Nord de la France par J.P. COLBEAUX (1977).

b) Le secteur oriental

Au niveau d'Oizy, le Gédinnien inférieur s'ennoie sous la partie supérieure de cet étage. La terminaison périclinale se complique de part l'existence de la digitation de l'anticlinal d'Oizy donnant naissance aux anticlinaux de Bertrix et de Paliseul (fig. 20). Cette digitation a probablement, du fait des différences de compétence entre les phyllades de Levrezy et les quartzophyllades de Braux, donné naissance à deux failles d'importance mineure à l'échelle régionale. Les miroirs de ces failles, porteurs de figures de distension, sont observables dans la carrière d'Oizy. Les accidents étant porteurs de minéralisations limonitiques uranifères, leur signification sera envisagée lors de l'étude de la carrière (voir 3<sup>e</sup> partie, Chap. I).

La fracturation est à l'image de ce que j'ai présenté précédemment. On observe à l'affleurement le développement des 2 familles  $D_1$  et  $D_2$  (fig. 23).

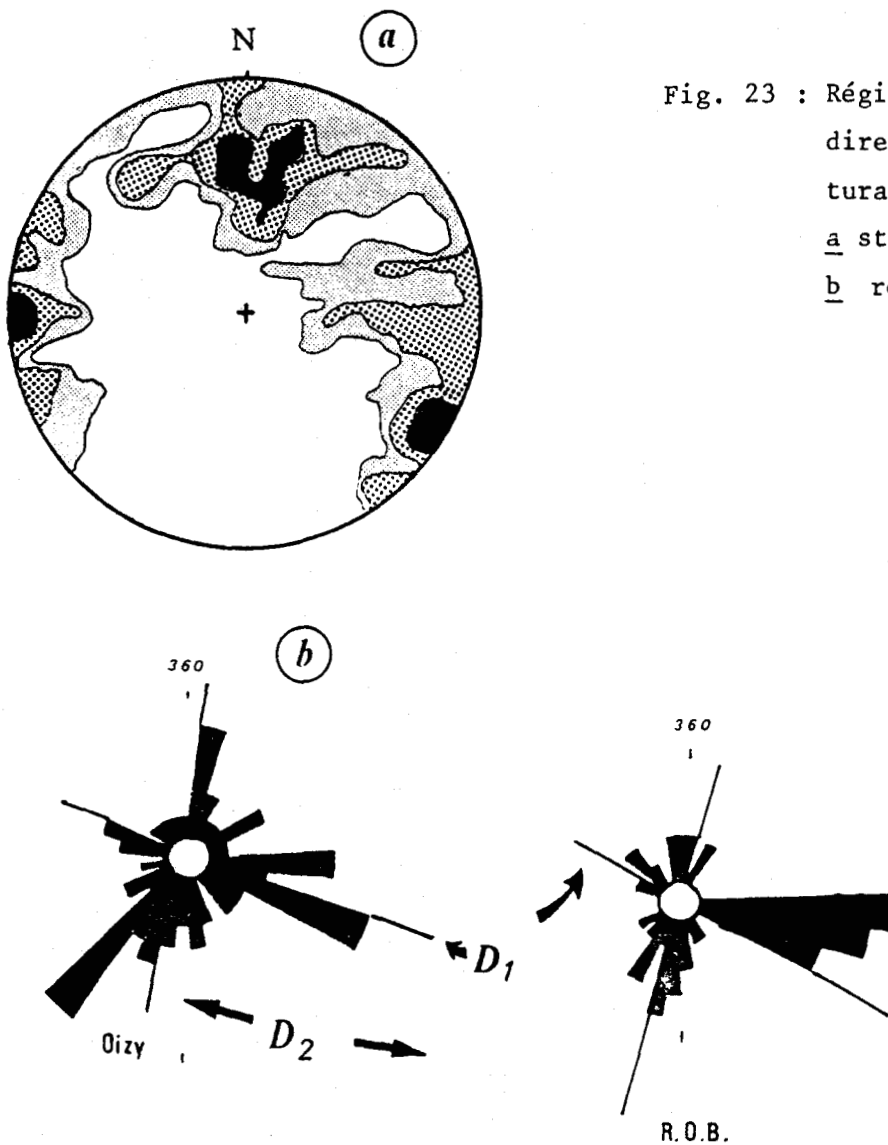


Fig. 23 : Région d'Oizy  
directions de frac-  
turation :  
a stéréogramme  
b rosaces

#### 3.2.2.4. Conclusions

De la présentation structurologique du secteur d'étude, il ressort que les observations de terrain sont en accord avec les données bibliographiques. Dans la suite du mémoire, certaines données vont être développées et utilisées pour la compréhension des anomalies radiométriques.

Je reviendrai plus en détail sur la fracturation, les failles ainsi que sur le comportement et la composition des quartzophyllades de Braux.

#### 3.2.3. Evolution post-paléozoïque. Généralités

##### 3.2.3.1. Les dernières transgressions et l'installation du réseau hydrographique

Du fait de la pénéplation du massif hercynien, les transgressions se sont développées dès le Permien. Au Secondaire, le sens de ces transgressions est variable. Au tertiaire, leur direction est constante (EK *et al.* 1976): la paléo-Mer du Nord s'établit.

Pour ce qui concerne plus particulièrement l'Ardenne, le Tertiaire est scindé en deux parties. Au Paléogène, la mer atteint tout le pays alors qu'au Néogène, l'Ardenne acquiert complètement son caractère de Haut Pays ébauché depuis l'érosion continentale de la chaîne hercynienne.

Depuis lors, l'Ardenne a été soumise à des phénomènes évolutifs continentaux qui ont conduit à la quasi disparition des dépôts secondaires et paléogènes.

Parallèlement à ceci, le réseau hydrographique actuel s'est mis en place : la Meuse et ses affluents (Semois, Sormonne, Chiens ...). La question posée par les géologues et géomorphologues est de savoir comment la Meuse actuelle a pu traverser le massif ardennais. Diverses hypothèses existent : l'antécédance, la surimposition, la capture.

Si G. WATERLOT (1945) parle de surimposition due aux mouvements épigénétiques du Miocène, A. LAURANT (1976) défend l'hypothèse de la capture de la Meuse lorraine par la Meuse de Dinant, cette capture se réalisant entre le Miocène et Pléistocène.

Dans cette région, le substratum paléozoïque a eu une influence importante sur la formation des vallées fluviales. En figure 24 (ALEXANDRE-PYRE *et al.*, 1976), on peut voir comment s'établit la relation schistosité-méandres (actuels et recoupés).

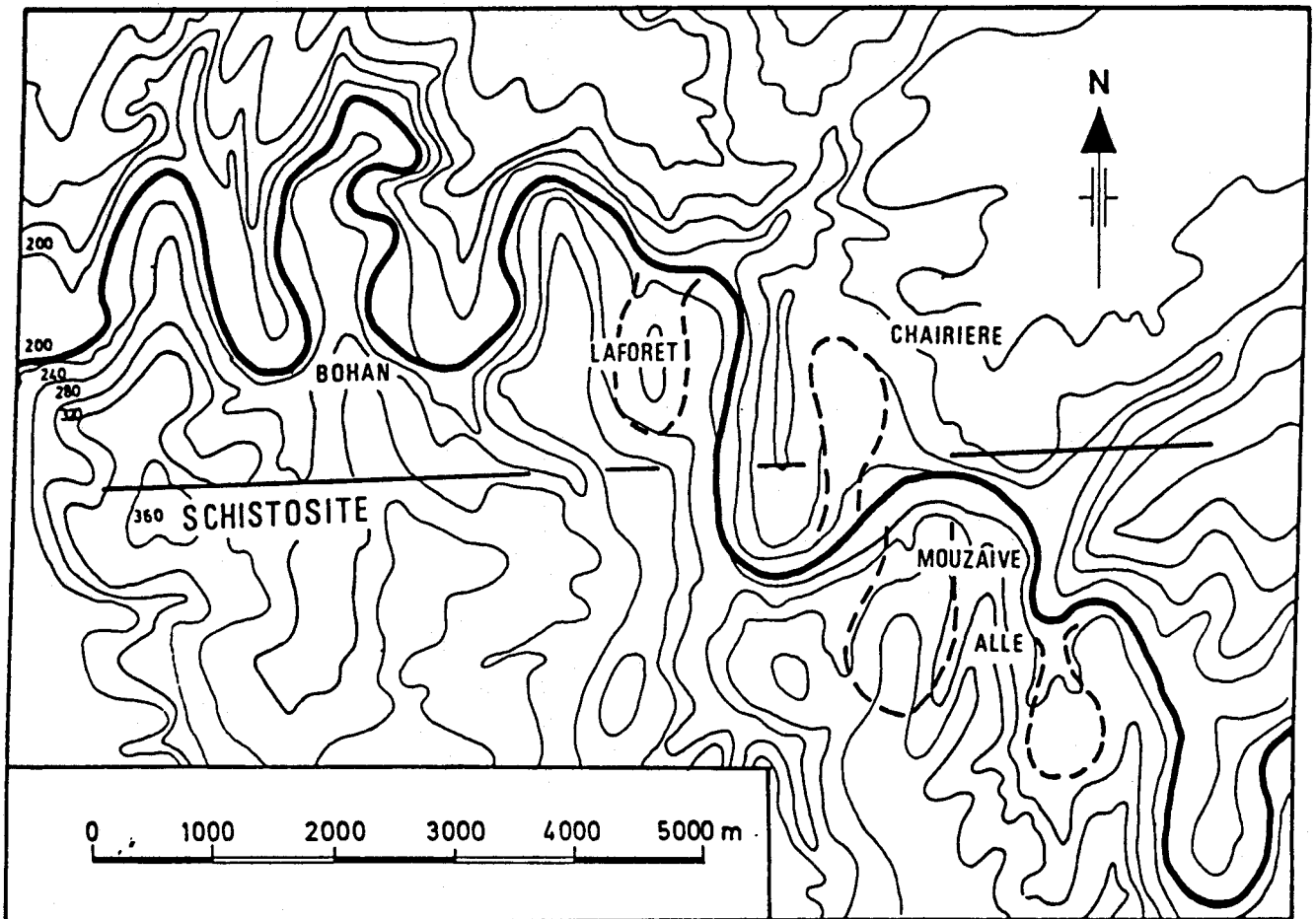


FIGURE 24 : Etirement nord-sud des méandres actuels et des méandres recoupés de la Semois en relation avec la direction est-ouest de la schistosité. (Equidistance : 40 m).

in Alexandre-Pyre et al. (1976)

### 3. 2. 3. 2. Les surfaces de transgression et les surfaces d'aplanissement

De façon générale, il est établi que les surfaces de transgression ne subsistent que lorsque leur substrat est assez résistant : Le Paléozoïque.

J. ALEXANDRE (1976) distingue plusieurs surfaces tant dans leur répartition géographique que chrono-stratigraphique. Il cite les périodes et situations suivantes :

- le Bundsandstein, à l'Est
- le Keuper à l'Ouest,
- le Keuper et le Lias au Sud,
- l'Eocène à l'Ouest,
- l'Oligocène au Nord

Leur topographie n'est pas, ainsi qu'on l'imagine, totalement plane : des vallons, des buttes résiduelles, des versants y sont décelables.

On distingue 2 types de surfaces d'aplanissement : celles du Tertiaire, celles du Quaternaire.

Les surfaces tertiaires laissent beaucoup d'incertitudes car l'altération chimique a rendu délicate leur conservation après dissection. Cette altération chimique est associée à un climat chaud et humide de type subtropical. Elle est caractérisée par :

- une arénitisation de certaines roches quartzeuses,
- une kaolinisation d'arkoses et même de schistes,
- une mise en solution des roches carbonatées,
- une libération des sels de fer qui donnent des teintes rouilles aux horizons superficiels et des encroûtements dans les roches poreuses ou fracturées.

Les surfaces d'aplanissement quaternaires se sont d'une façon générale développées sur un substrat moins résistant que les précédentes. En Ardenne cependant, de nombreux vestiges demeurent. Leur modèle, leurs relations avec les terrasses fluviatiles indiquent qu'elles se sont développées en climat périglaciaire.







2<sup>ème</sup>

PARTIE







# CHAPITRE I

## PROSPECTION RADIOMETRIQUE

- Autoportée
- Pédestre





## CHAPITRE I : RESULTATS DES PROSPECTIONS RADIOMETRIQUES AUTOPORTEES ET PEDESTRES.

### 1.1. PROSPECTION RADIOMETRIQUE AUTOPORTEE

#### 1.1.1. L'ANTICLINAL DE L'ARDENNE

Je présenterai les résultats obtenus lors de la prospection du Dévonien inférieur de l'Anticlinal de l'Ardenne. Pour les méthodes et l'appareillage employés, je renvoie le lecteur au rapport publié par les responsables de la prospection en uranium de l'Ardenne : "Reconnaissance survey for uranium in the belgian Paleozoic" par CHARLET, DEJONGHE, DE WITTE, DRUMEL, HENRY, HERBOSCH, LEFIN, MARTIN (1983).

De cet ouvrage est tiré le tableau présenté en figure 25 . Sa lecture montre que, des trois étages du Dévonien inférieur, le Gédinnien semble le moins favorable à la concentration de l'uranium.

Formation		eU (ppm)	Th (ppm)	K <sub>2</sub> O (%)	T. C. (ur)	Th/U	
DEVONIE N I N F E R I E U R	Emsien	$\bar{x}$	3,77	11,20	2,49	22,07	3,68
		s	1,53	2,80	0,74	5,14	2,79
	Siegénien	$\bar{x}$	3,79	10,63	2,27	20,89	3,63
		s	2,18	3,16	0,65	5,83	2,92
	Gédinnien	$\bar{x}$	3,35	9,83	2,16	18,59	4,23
		s	1,52	2,99	0,72	5,37	7,98
	Dév. inf.	$\bar{x}$	3,70	10,73	2,35	20,96	3,76
		s	1,81	3,01	0,72	5,58	4,27

Fig. 25 : Concentrations moyennes en radioéléments enregistrées lors de la prospection autoportée du Dévonien inférieur .

A partir des données radiométriques enregistrées, les auteurs ont établi des cartes radiométriques. Pour ce faire, dans le cas de l'uranium, ils ont



sélectionné trois classes de concentration :

- . classe 1 : de 0 à 3 ppm d'eU
- . classe 2 : de 3 à 6 ppm d'eU
- . classe 3 : plus de 6 ppm d'eU

Cependant, les résultats sont à interpréter avec prudence. Il est établi que l'intensité du rayonnement est fonction de la dimension de l'affleurement considéré.

Ainsi, une absence d'anomalie peut correspondre à une concentration normale en radioéléments ou à une absence d'affleurement. Le corollaire peut lui aussi être vrai. Des anomalies apparentes se sont révélées être dues à des masses rocheuses importantes.

Malgré tout, des concentrations anormales ont été confirmées dans l'Anticlinal de l'Ardenne. C'est le cas de celle de Daverdisse (L. DEJONGHE J.M. CHARLET, Ch. DUPUIS, 1982; J. JEDWAB, L. DEJONGHE, 1982) ou de celle d'Oizy, objet de ce mémoire (fig. 26),



□ 3ppm < eU    ▨ 3ppm < eU < 6    ■ eU > 6 ppm

Fig. 26 : Carte des anomalies radiométriques mises en évidence lors de la prospection autoportée de l'Anticlinal de l'Ardenne (extrait de Charlet & al., 1983)

Géd. : Gédinnien      R : Massif de Rocroi  
Sieg. : Siegénien      S : Massif du Serpont

### 1.1.2. L' ANOMALIE DE LA CARRIERE D'OIZY

La figure 27 présente l'enregistrement de cette anomalie réalisé lors de la prospection autoportée.

Quatre données sont enregistrées simultanément, par spectrométrie gamma :

- le Total Count (T.C.) donne la radioactivité globale (seuil énergétique à 1 M.e.v.),
- la fenêtre énergétique centrée sur la raie à 2,60 M.e.v. du Tl 208 descendant du Thorium 232,
- la fenêtre énergétique centrée sur la raie à 1,69 M.e.v. du Bi 214 descendant de l'Uranium 238,
- la fenêtre énergétique centrée sur la raie à 1,40 M.e.v. du K 40.

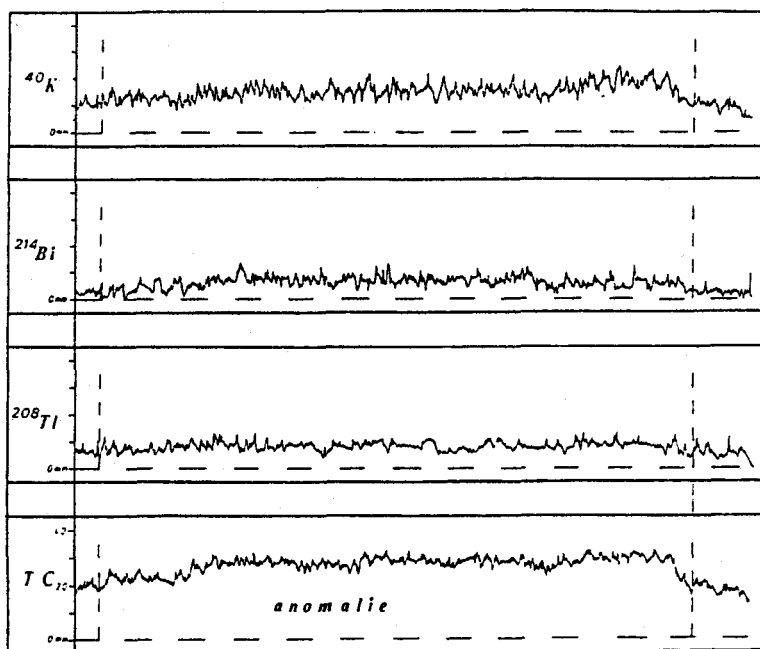


Fig. 27 : Enregistrement de l'anomalie d'Oizy

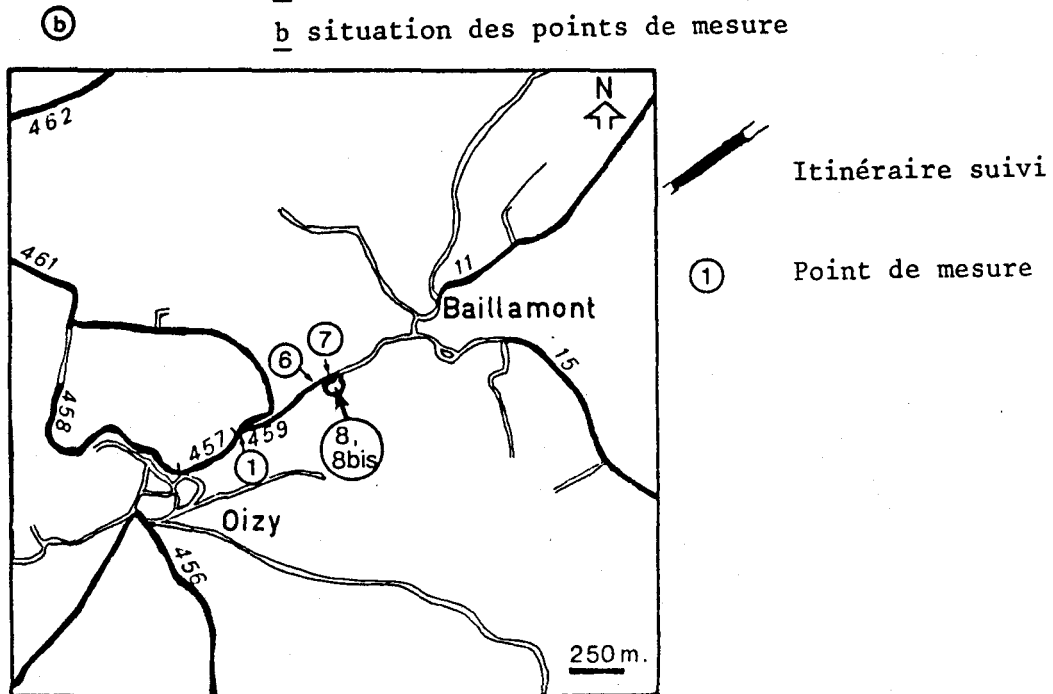
La courbe T.C. nous permet de localiser l'anomalie par comparaison au bruit de fond plus faible. Dans le cas présent, cette anomalie est à mettre en relation avec les concentrations en Uranium et en Thorium.

En figure 28 , on trouvera les teneurs établies à partir des mesures autoportées selon la méthode développée et mise en oeuvre par CHARLET, DRUMEL, QUINIF et YANS (1982).

(a)

	$K_2O$ (%)	eU (ppm)	Th (ppm)	T. C. (ur)	Th/U
MOY. GED.	2,16	3,35	9,83	18,59	2,93
Oizy 1	1,91	5,52	7,74	13,90	1,40
Oizy 6	1,99	6,43	9,27	13,12	1,44
Oizy 7	2,30	7,35	12,33	16,87	1,68
Oizy 8	2,46	11,02	13,86	21,91	1,26
Oizy 8bis	2,77	9,19	15,39	22,15	1,67

Fig. 28 :Anomalie d'Oizy - Conversion des données de l'autoportée en teneurs de radioéléments  
a tableau des teneurs  
b situation des points de mesure



L'anomalie d'Oizy a été le point de départ de mes travaux de recherche. Dans un premier temps, je me suis attaché à en étudier le contexte géologique et à en préciser les limites à l'aide d'un scintillateur portable. Dans un deuxième temps, j'ai tenté, dans une prospection pédestre, de localiser d'autres anomalies.

## 1.2. PROSPECTION RADIOMETRIQUE PEDESTRE

On trouvera en annexe I et II la description du matériel employé ainsi que le tableau d'étalonnage de celui-ci et le mode de conversion de la radioactivité total (T.C.) en unités de radioactivité ( $U_r$ ).

La finalité de cette prospection était de préciser la campagne auto-portée en affinant les mesures et en prospectant les zones hors de portée du véhicule tout-terrain employé alors. La carte des itinéraires suivis figure en planche hors-texte ( fig. I , hors-texte).

### 1.2.1. RESULTATS DE LA PROSPECTION DE LA PARTIE OCCIDENTALE

Dans cette partie, je n'ai pas obtenu de résultats probants lors de la prospection pédestre. La radioactivité totale est faible : elle varie de 10 à 33  $U_r$ . Le seul pointement anomal qui ait été confirmé par la suite comme étant un indice mineur est celui de Chertiri, non loin d'Orchimont (fig. 29).

Cet affleurement est situé dans la vallée du ruisseau de Nafraiture. Les couches observables appartiennent aux phyllades de Levrézy qui affleurent sur environ 500 m. Ce pointement anomal apparaît être à l'image de celui d'Oizy, à l'intensité près, c'est-à-dire lié à un remplissage limonitique de fracture.

### 1.2.2. RESULTATS DE LA PROSPECTION DE LA PARTIE ORIENTALE

La radioactivité totale enregistrée est comprise entre 10 et 140  $U_r$ . Cependant, le levé pédestre n'a pas mis en évidence beaucoup d'anomalies nouvelles. Seul le prolongement de l'anomalie de la carrière d'Oizy vers l'Ouest dans le talus de la route d'Oizy à Baillamont (R.O.B.) a été mis en évidence lors de l'étude préliminaire réalisée par le laboratoire de Minéralogie de la Faculté Polytechnique de Mons.

Dans le cas de la carrière, la liaison de l'anomalie avec la fracturation est directement visible à l'affleurement. Pour la R.O.B., les poin-

tements anomaux, au nombre de deux pour une coupe de 800 mètres environ dans les quartzophyllades de Braux et les phyllades de Levrézy, sont plus difficilement interprétables sur le terrain. On pourrait les considérer comme stratiformes dans le prolongement des anomalies de la Carrière ou liés à une microfracturation. Intuitivement, on peut opter pour la seconde solution.

### 1.2.3. CONCLUSIONS

La première ambition de cette prospection était la constitution d'une carte de la radioactivité des terrains étudiés. Il m'a fallu malheureusement y renoncer pour deux raisons principales : la rareté des anomalies radio-métriques, et la rareté d'affleurements dans certaines zones, notamment entre Oizy et Vresse.

Pour pallier ces défauts, pour mieux circonscrire les anomalies rencontrées et éventuellement en découvrir de nouvelles, il m'a fallu employer un autre type de méthode de prospection.

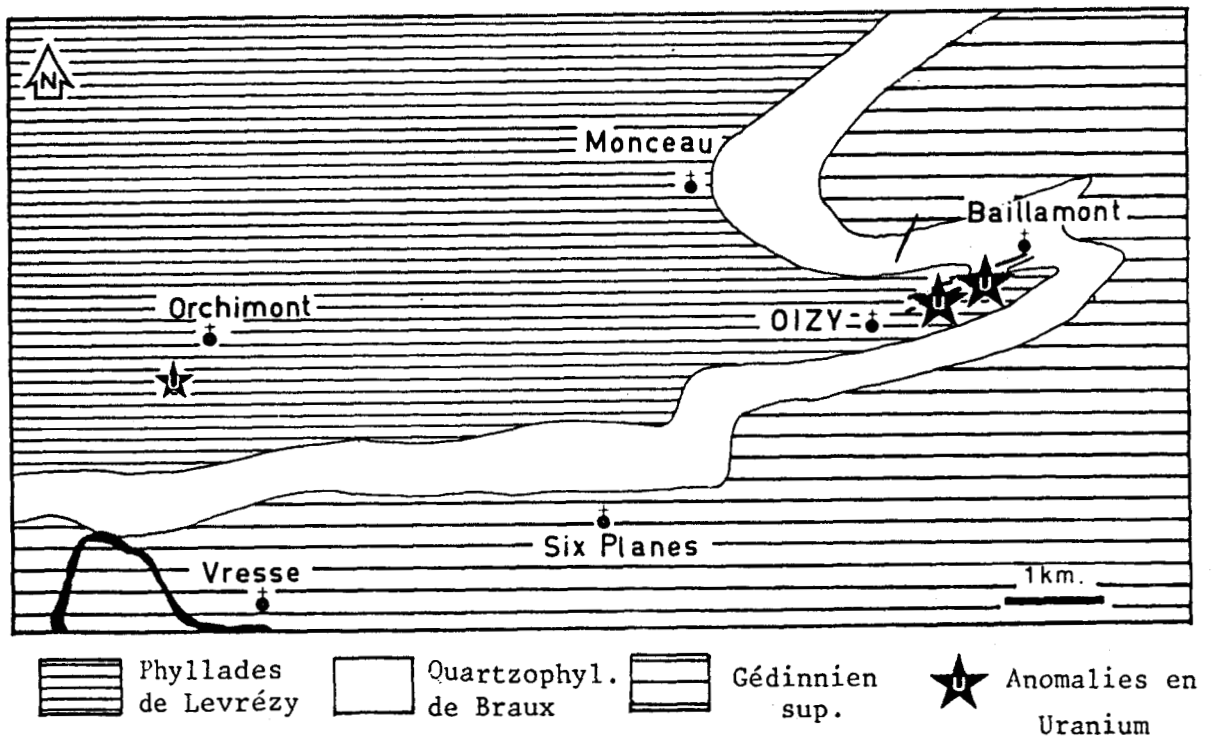


Fig. 29 : Situation géologique des anomalies décrites



## CHAPITRE II

### PROSPECTION DES ANOMALIES CACHEES

- Prospection stratégique
- Prospection tactique







## CHAPITRE II.- PROSPECTION DES ANOMALIES CACHEES

### 2.1. INTRODUCTION : LE CHOIX DE L'OUTIL

J'ai déjà exposé les raisons des difficultés rencontrées lors de la prospection radiométrique, à savoir d'une part, le manque d'affleurement et, d'autre part, la présence d'une couverture quaternaire très importante dans certains endroits. Il m'a donc fallu renoncer à n'utiliser que des méthodes purement radiométriques. J'ai décidé d'employer les méthodes gaz (détection du Radon 222) de deux façons :

- . en prospection stratégique afin de déceler de nouvelles anomalies sous la couverture en appliquant, pour la première fois en Belgique, un mode de détection du Radon dans les eaux naturelles;
- . en prospection tactique afin de déterminer l'extension de l'anomalie d'Oizy grâce à l'emploi de détecteurs au charbon actif ("boukoals") ou d'un émanomètre.

J'ai rappelé en première partie, Chapitre II, que le Radon 222 est un gaz rare, descendant de l'Uranium. C'est à ce titre qu'il est employé comme indicateur de la présence de gisement d'Uranium.

### 2.2. PROSPECTION STRATEGIQUE : Prospection hydrologique

#### 2.2.1. INTRODUCTION

Y. QUINIF et Ph. BOUKO du Laboratoire de Minéralogie de la F.P.Ms dans le cadre de leurs travaux sur le comportement physico-chimique du Radon 222 dans les sols tentaient de mettre au point une technique nouvelle de détection du Radon dans les eaux naturelles. Ils avaient réalisé des études de laboratoire, il leur manquait l'occasion de mettre au point des techniques de travail sur le terrain et un site d'étude. C'est à ce niveau que nos préoccupations se sont rejointes et ont permis l'avancement de nos travaux respectifs.

## 2.2.2. DESCRIPTION DE LA METHODE

### 2.2.2.1. Introduction

L'étude de la radioactivité des eaux naturelles n'est pas une nouveauté en soi . En France, le S.C.P.R.I.\* a réalisé une étude assez complète des sources hydrominérales (M.L. REMY et P. PELLERIN, 1968, 1982). D'autre part, la surveillance de la radioactivité des eaux naturelles est une méthode efficace de détection des pollutions, ce qui explique l'existence de structures telles que celle du S.C.P.R.I. dont c'est une des missions (P. PELLERIN, 1980).

En Belgique, ce travail est assuré par divers organismes dont les services d'hygiène du Ministère de la Santé Publique.

Pour ce qui est de la prospection minière, les méthodes utilisées par ces laboratoires sont trop lourdes et trop onéreuses à mettre en oeuvre. Notre technique de prospection a l'avantage d'être simple d'utilisation sur le terrain et même au laboratoire. Elle s'appuie sur la propriété qu'a le Radon 222 de se dissoudre préférentiellement dans certains composés organiques. Cette propension a déjà été mise en évidence dans le passé (E. RAMSTEDT, 1911; R. SZWINNE, 1913). Plus près de nous, R. POCHET (1982) a décrit et appliqué une méthode de dosimétrie du Radon dans l'eau (ou les sols saturés) selon une verticale (forages). Cependant cette méthode conserve une lourdeur d'application liée à l'existence d'un certain temps d'intégration.

### 2.2.2.2. Principe de la méthode

#### a) Comportement du Radon dans les fluides

Dans les eaux naturelles, le plus souvent les radioéléments sont présents à de faibles concentrations. Aussi, lorsqu'on veut les doser, des techniques complexes telles celles des organismes de santé publique, peuvent être employées. Une autre méthode de travail est envisageable : la préconcentration. Cette dernière, dans le cas du Radon 222 est facilitée par la plus grande solubilité de ce gaz dans les liquides organiques (Y. QUINIF, P. DOREMUS, Ph. BOUKO, J.M. CHARLET, 1984). J'utilise du Toluène pour cette opération. Les figures 30 et 31 indiquent les coefficients de partage éta-

---

\* S.C.P.R.I. : Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants.

blis entre l'eau et le toluène pour le radon. D'après la bibliographie (H. STEPHEN et T. STEPHEN, 1963), le coefficient de partage :

$$R = \frac{S_2}{S_1} \quad \text{varie de 47 à 53 entre 15 et 25°C}$$

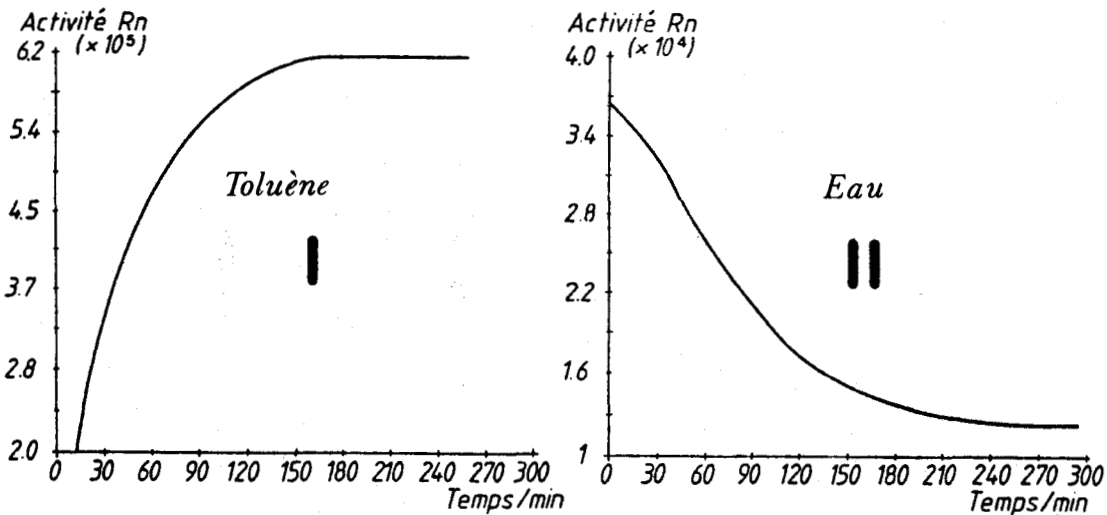
avec S1 : solubilité du Rn 222 dans H<sub>2</sub>O

S2 : solubilité du Rn 222 dans le toluène

Figure 30 :  
Solubilités du Radon  
dans l'eau et dans le  
Toluène (H. Stephen et  
al., 1963)

t.°	solubilité S1	S2	R = $\frac{S_2}{S_1}$
	Rn - H <sub>2</sub> O 2 cc/cc	Rn.Tol. cc/cc	
-18		27,00	
-10		22,50	
-5		20,60	
0	0,508	18,40	36,22
5	0,41	17,00	41,46
10	0,34	15,70	46,17
15	0,29	13,90	47,93
20	0,245	13,20	53,87
25	0,215	11,40	53,02
30	0,195	10,50	53,84
40	0,16	8,87	55,43

Fig. 31 : Activités comparées du Radon  
dans l'eau et dans le Toluène  
(Y.Quinif, 1984).



En laboratoire, Y. QUINIF (communication personnelle, fig. 31) détermine un R de l'ordre de 48 par la méthode qui a été appliquée pour doser le Radon lors de la prospection (voir 2ème partie, Chapitre III).

Pratiquement, le Radon de l'eau prélevée à la source, dans un puits, une fontaine ou une rivière, est extrait par le toluène. L'activité gamma des descendants solides du Radon 222 (Pb 214 et Bi 214) contenus dans le toluène est ensuite mesurée par scintillométrie.

b) Mode opératoire (planche photo I )

- Sur le terrain : en me plaçant dans l'optique d'une prospection, j'ai mis au point un mode de prélèvement remplissant les conditions suivantes :

- . Fiabilité
- . Robustesse
- . Maniabilité

Dans un premier temps, j'avais opté pour une pompe électrique alimentée par un petit groupe électrogène. A l'usage, il s'est avéré qu'il était difficile de mener à bien, seul, une campagne de prélèvements. Le problème a été résolu lorsque j'ai réussi à adapter une pompe à bras (de type "Japy") à nos conditions de prélèvements (planche photo I ).

Un litre d'eau est pompé au plus près du point de source (fig. 32). Le Radon diffusant très facilement à travers certains matériaux (les plastiques notamment), l'étanchéité est assurée par l'emploi d'une bouteille

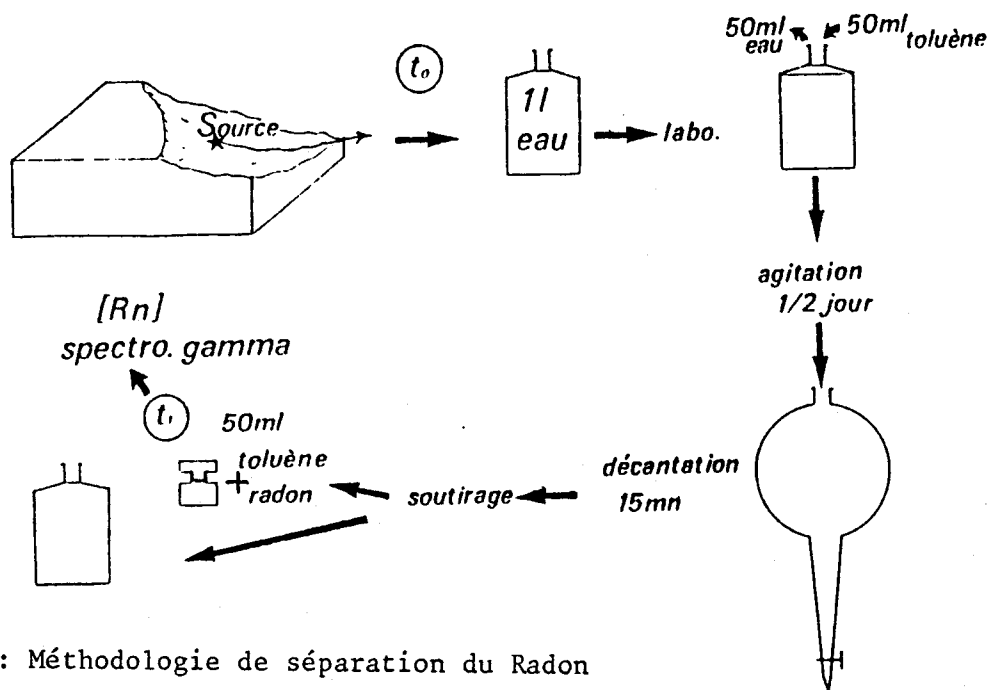


Fig. 32 : Méthodologie de séparation du Radon

de verre à col rodé, avec joint de graisse aux silicones (Y. QUINIF, P. DOREMUS, Ph. BOUKO, J.M. CHARLET, 1984). Le moment de prélèvement est l'instant  $t_0$  à partir duquel l'activité du radon de cette eau commence à décroître (fig. 32).

- Au Laboratoire (Planche Photo I ) : étant donnée la courbe de mi-vie du Radon (3,81 jours), on remplace au plus vite 50 ml d'eau par 50 ml de toluène.

Pendant une demi-journée, les échantillons sont agités régulièrement (fig.32) pour faciliter la concentration du radon en phase organique.

En fin d'agitation l'eau et le toluène sont séparés par soutirage. Le toluène, versé dans un petit flacon de verre, voit son activité gamma mesurée par scintillomètre pendant 400 secondes. Le moment de la mesure constitue l'instant  $t_1$ .

Connaissant  $t_0$ ,  $t_1$  et  $A_1$  (mesuré), on calcule  $A_0$ , l'activité initiale de l'eau suivant la loi de décroissance du Radon :

$$A_0 = A_1 \exp (-\lambda (t_1 - t_0))$$

Enfin les échantillons sont stockés pendant environ 1 mois pour permettre le dosage du Radium dissous (2ème Partie, Chapitre III).

### 2.2.3. APPLICATION AU TERRAIN D'ETUDE

Trois facteurs principaux ont eu une influence sur le choix des zones de prélèvements :

- l'hydrographie,
- les résultats de la prospection scintillométrique,
- la densité des affleurements rocheux

Je présente dans les figures hors texte :

- la situation géographique de tous les points de prélèvements (fig. I),
- les cartes de prospection mensuelle (fig.II),
- une carte synthétique de la prospection hydrogéologique (fig. III) : c'est-à-dire, le bilan de 10 campagnes de prélèvements.

En début de prospection, il m'a fallu déterminer une zone témoin du bruit de fond. Après quelques tâtonnements, il a été établi que les prélèvements faits à Chairière en S 36, S 37, S 38 peuvent servir à la figuration du bruit de fond. En effet, les taux de comptage enregistrés n'atteignent jamais le seuil anomalique et sont le plus souvent nettement en-dessous de ce dernier (voir Tableau des taux de comptage en Annexe).

PLANCHE PHOTO. I  
LEGENDE

SUR LE TERRAIN

PHOTO I : Pompage de l'échantillon à l'aide d'une pompe de type "JAPY"(A)  
dans un flacon de verre (B)

AU LABORATOIRE

PHOTO 2 : Incorporation de 50 ml de Toluène à l'échantillon de 1 litre  
d'eau,  
Agitation intermittente.

PHOTO 3 : Après 4 heures d'agitation : décantation en ampoule (A),  
soutirage de l'eau, récupérée et  
remise en flacon (B),  
remplissage de petits pots de 50 ml  
de Toluène chargé de Radon.

PHOTO 4 : Pot de Toluène chargé de Radon destiné à la spectrométrie gamma.



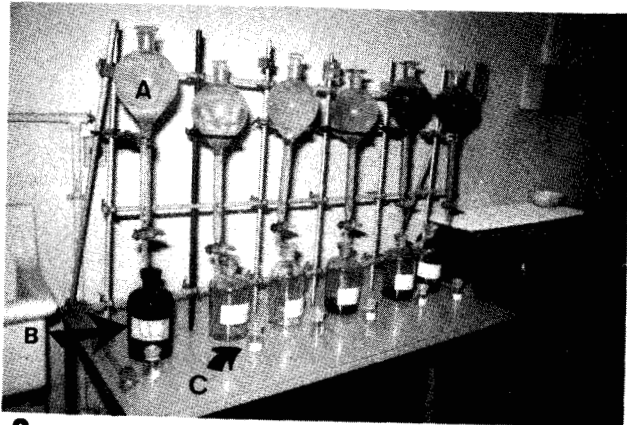
PLANCHE I



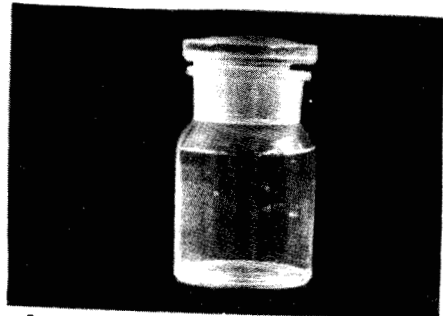
1



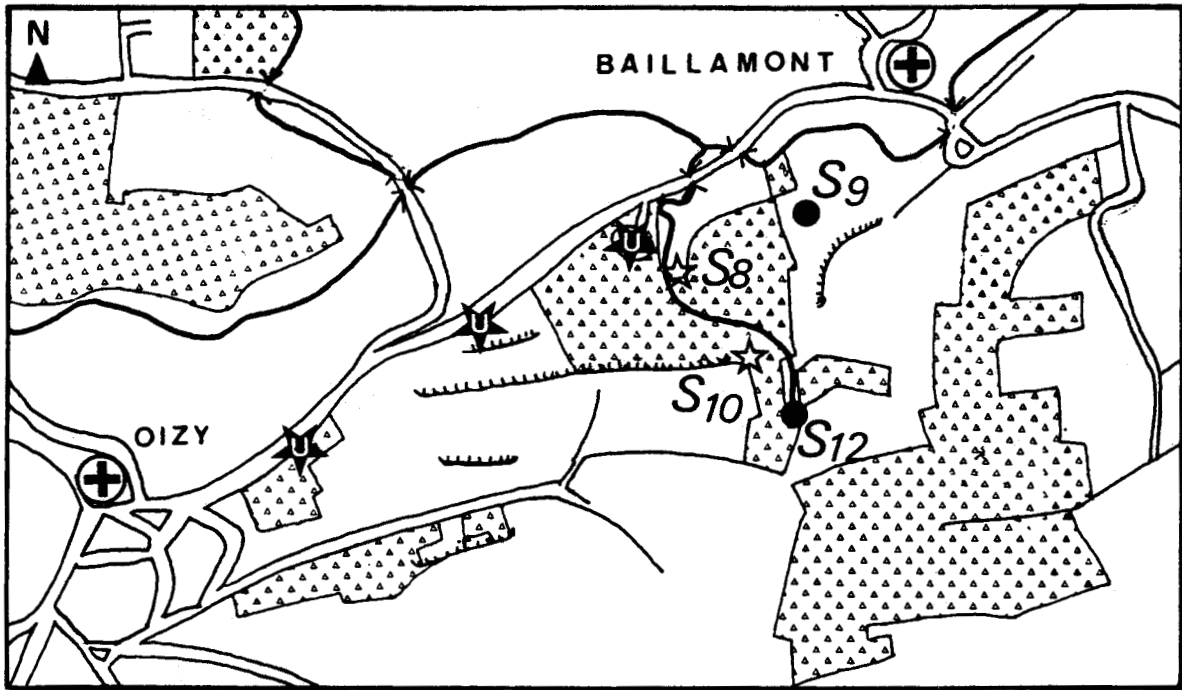
2



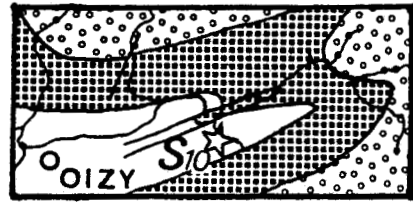
3



4



250m



1km

- ★ Anomalie en Uranium
- ☆ Source anormale en Radon
- Source    \* Puits
- ▣ Sapinières
- ▣ Gédinnien supérieur
- ▣ Quartzophyllades de Braux
- ▣ Phyllades de Levrézy      Géd. inf.

Fig. 33 : Anomalie d'OIZY : situation géographique et géologique.

### 2.2.3.1. Prospection du secteur oriental

#### a) Anomalie d'Oizy

Le site d'Oizy (fig. 33) a tout naturellement été choisi pour tester la méthode. Au départ, je savais que, normalement, du radon était présent dans les eaux des sources aux environs d'Oizy. Une fois le fait établi, en comparant les taux de comptage des sources de ce secteur, avec ceux des sources de régions ne présentant aucune anomalie, comme celle de Chairière (S36, S37, S38, fig. I hors-texte), j'ai pu déterminer un seuil anomal .

Le comptage minimum enregistré pour la source S 36 à Chairière est de 14,25 cp/mn., le comptage enregistré à Oizy, le même jour, en S 8 (source la plus proche de la carrière) est lui de 897,69 cp/mn soit presque 63 fois plus ! En routine, les comptages considérés comme mettant en évidence un début d'anomalie sont de l'ordre de 400 cp/mn.

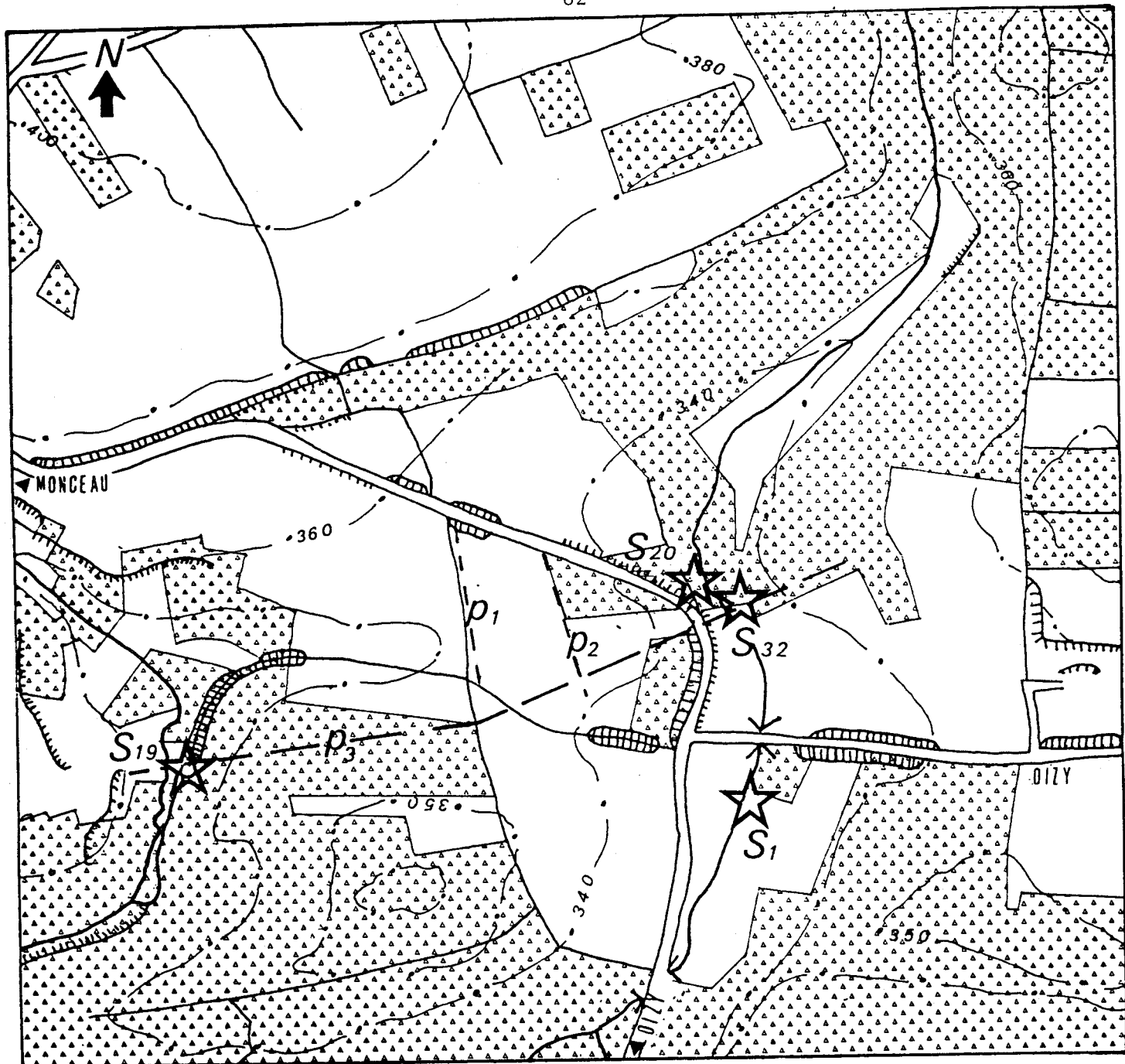
Les anomalies rencontrées en S 8, S 10 et S 12 (fig. 33) étaient attendues. Dans le cadre de la prospection tactique de l'anomalie d'Oizy, les données de l'hydrologie ont été utilisées (voir en 2-3). La figure 33 situe les sources. Sur le plan géologique, elles sont dans les quartzo-phyllades de Braux ou dans leur immédiate proximité.

#### b) Anomalie de Monceau.

Cette anomalie comme les deux suivantes, a été mise en évidence par la prospection hydrogéologique. Aucune anomalie radiométrique de surface n'avait été repérée.

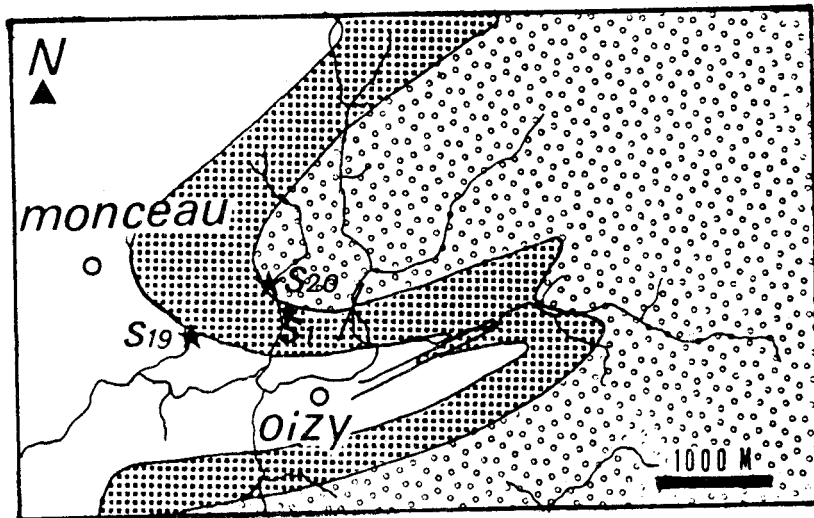
fig. 34 :  
Activités des sources de  
Monceau en Mai 1984, compa-  
raison avec S8 (Oizy) et  
S36 (bruit de fond).

	$A_o$ c/mn	$A_o$ /BF
S <sub>1</sub>	719,10	8,62
S <sub>19</sub>	1524,30	18,27
S <sub>20</sub>	1112,25	13,33
S <sub>32</sub>	997,50	11,96
S <sub>41</sub>	1406,25	16,86
S <sub>8</sub>	1033,05	12,38
S <sub>36</sub>	83,40	1.



**150m**

- ★ Anomalie en Uranium
- ☆ Source anormale en Radon
- Source    \* Puits
- ▨ Sapinières
- ▩ Gédinnien supérieur
- ▧ Quartzophyllades de Braux
- Phyllades de Levrézy



Ged. inf.

Dans le cas de Monceau, 5 sources ont des activités Radon anormales (fig. 34 et 35) . La lecture du tableau de la figure 34 indique que les taux de comptage sont en moyenne, au mois de mai, supérieurs à ceux d'Oizy et nettement anormaux de 8 à 18 fois la normale.

Il n'est donc pas impossible, à la vue de ces résultats, d'imaginer l'existence en profondeur, dans ce secteur d'une anomalie radiométrique semblable à celle d'Oizy. La confirmation est à chercher avec d'autres moyens:

- émanométrie,
- carottage et spectrométrie gamma *in situ*,

Ces techniques ont été utilisées lors de la prospection tactique qui a été faite sur ce site (voir en 2-3).

Du point de vue situation géologique, les sources ont une implantation comparable à celles d'Oizy : elles naissent dans les quartzophyllades de Braux.

c) Anomalie du Rouvelet - Les Maisonnnettes

Ce secteur, immédiatement au Sud d'Oizy, concerne une dizaine de sources dont six ont été plus particulièrement étudiées (fig. 36) .Seules deux d'entre elles se sont révélées anormales ( $S_7$  et  $S_{22}$ ) (fig. 37).

En étudiant la situation des sources : ligne de partage des eaux, situation topographique (altimétrie), contexte géologique, on peut proposer de mettre en relation  $S_{22}$  et  $S_7$  (fig. II et III, hors-texte). Ces sources seraient ainsi porteuses d'un message Radon dont l'origine serait à rechercher quelque part entre les deux points considérés. Une étude tactique serait à réaliser dans cette zone.

fig. 36 :

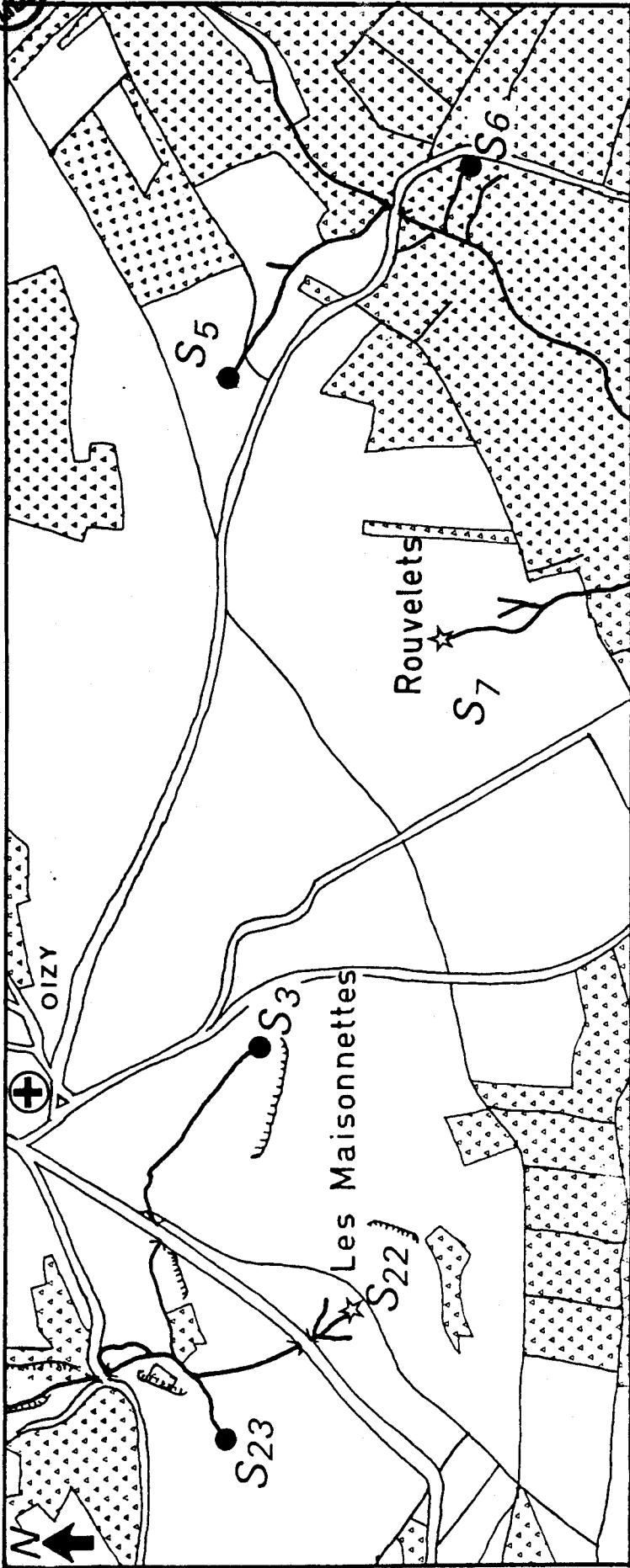
Activités des sources du Rouvelet - Les Maisonnnettes en Mai 1984, comparaison avec S8 (Oizy) et S36 (bruit de fond)

	$A_o$ cps/mn	$A_o/BF$
$S_3$	163,80	1,96
$S_5$	319,95	3,83
$S_6$	500,55	6,00
$S_7$	920,25	11,03
$S_{22}$	862,20	10,33
$S_{23}$	444,75	5,33
$S_8$	1033,05	12,32
$S_{36}$	83,40	1.

fig. 35 :

Anomalie de MONCEAU: situation géographique et géologique.  
( $P_1, P_2, P_3$ : profils émanométriques)

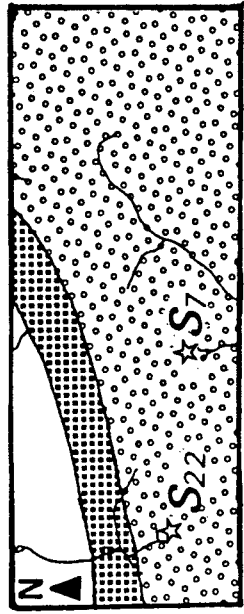
BU  
MNE



250m

- Anomalie en Uranium
- Source anormale en Radon
- Source \* Puits
- Sapinières
- Gédinnien supérieur
- Quartzophyllades de Braux
- Phyllades de Levrézy

Géd. inf.



1km

d) Anomalie de Six Planes

La quatrième des anomalies mises en évidence lors de la prospection hydrologique est située dans un vallon (fig. 38). Ceci a pour conséquence principale que les coulées de solifluxion quaternaire ont masqué l'ensemble des affleurements. Une prospection au scintillateur ne permettait donc pas de repérer d'éventuelles anomalies, seule l'étude des eaux de sources ou de puits a permis de les localiser.

Sur cette zone 11 points de prélèvements ont été étudiés. Les plus chargés en radon sont : S<sub>4</sub>, S<sub>28</sub> et P<sub>44</sub> (fig. 39). Un "pôle" Radon semble donc bien mis en évidence au niveau de Six Planes.

Fig. 38 :  
Activités des sources de Six Planes en Mai 1984, comparaison avec S8 (Oizy) et S36 (bruit de fond).

	A <sub>O</sub> c/mn	A <sub>O</sub> /BF
S <sub>4</sub>	1030,65	12,35
S <sub>13</sub>	538,35	6,45
S <sub>15</sub>	654,45	7,84
S <sub>16</sub>	609,60	7,30
S <sub>21</sub>	496,35	5,95
S <sub>28</sub>	774,45	9,28
S <sub>34</sub>	570,60	6,84
P <sub>44</sub>	1017,66	12,20
P <sub>45</sub>	462,62	5,54
P <sub>46</sub>	484,96	8,21
S <sub>8</sub>	1033,05	12,38
S <sub>36</sub>	83,40	1.

◀ Fig. 37 :  
Anomalie du ROUVELET - LES  
MAISONNETTES: situation géo-  
logique et géographique.



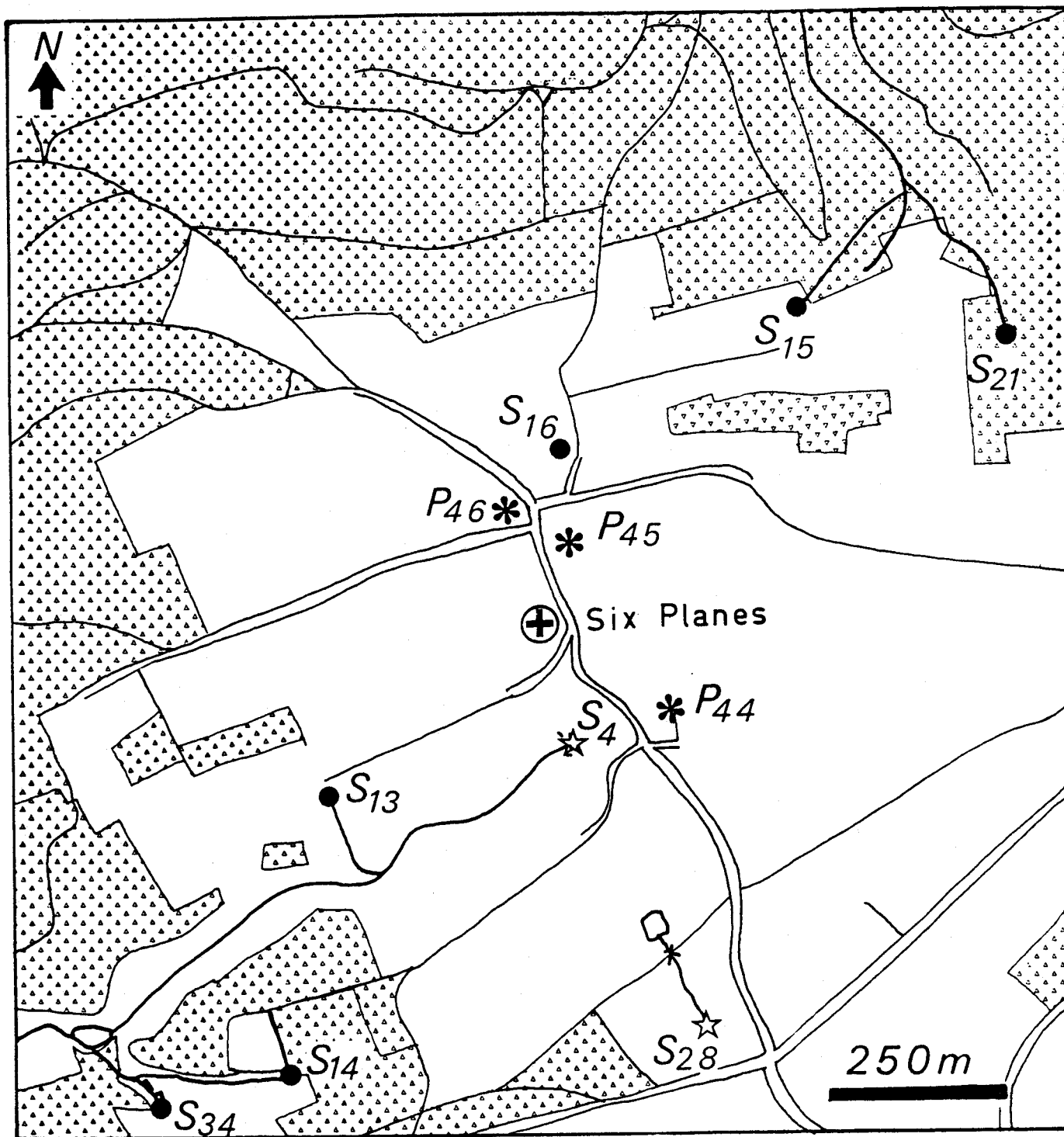
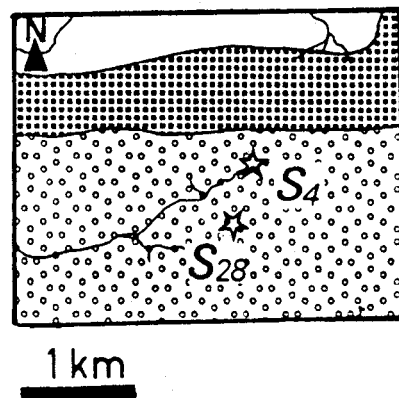


Fig. 39 : Anomalie de SIX PLANES : situation géographique et géologique.

- ★ Anomalie en Uranium
- ☆ Source anormale en Radon
- Source      \* Puits
- ▨ Sapinières
- ▤ Gédinnien supérieur
- ▧ Quartzophyllades de Braux
- Phyllades de Levrézy

Ged. inf.



### 2.2.3.2. Prospection du secteur occidental : anomalie de Chertiri

La couverture en prospection radiométrique de ce secteur est bonne car les vallées encaissées y sont nombreuses. Le fait qu'un indice radiométrique de faible intensité ait été relevé m'a amené lors de la prospection hydrogéologique à tester quelques sources environnantes. Seule l'une d'entre elles ( $S_{26}$ ) située non loin de l'indice de Chertini (fig. 40) semble nous fournir des teneurs légèrement anormales (500 Cps/mn).

$S_{26}$  est à 300 m à l'Ouest de l'anomalie radiométrique relevée. Le point de source est à flanc de coteau, à la limite socle paléozoïque-couverture quaternaire. L'eau semble donc venir d'une nappe drainant cet interface.

Du point de vue géologique, les terrains qui affleurent, appartiennent aux Phyllades de Levrézy.

### 2.2.4. CONCLUSIONS

Le premier bilan de la prospection hydrogéologique est donné par les figures II et III hors-texte : cinq anomalies en Radon sont mises en évidence par dosage des eaux de sources.

Dans le cas de l'anomalie d'Oizy, ce type de prospection n'était pas a priori indispensable, mais la certitude préalable de l'existence de cette anomalie Radon a permis la mise au point de la technique de prospection. De plus, les résultats obtenus ont été utilisés dans le cadre de la prospection tactique (voir en 2-3).

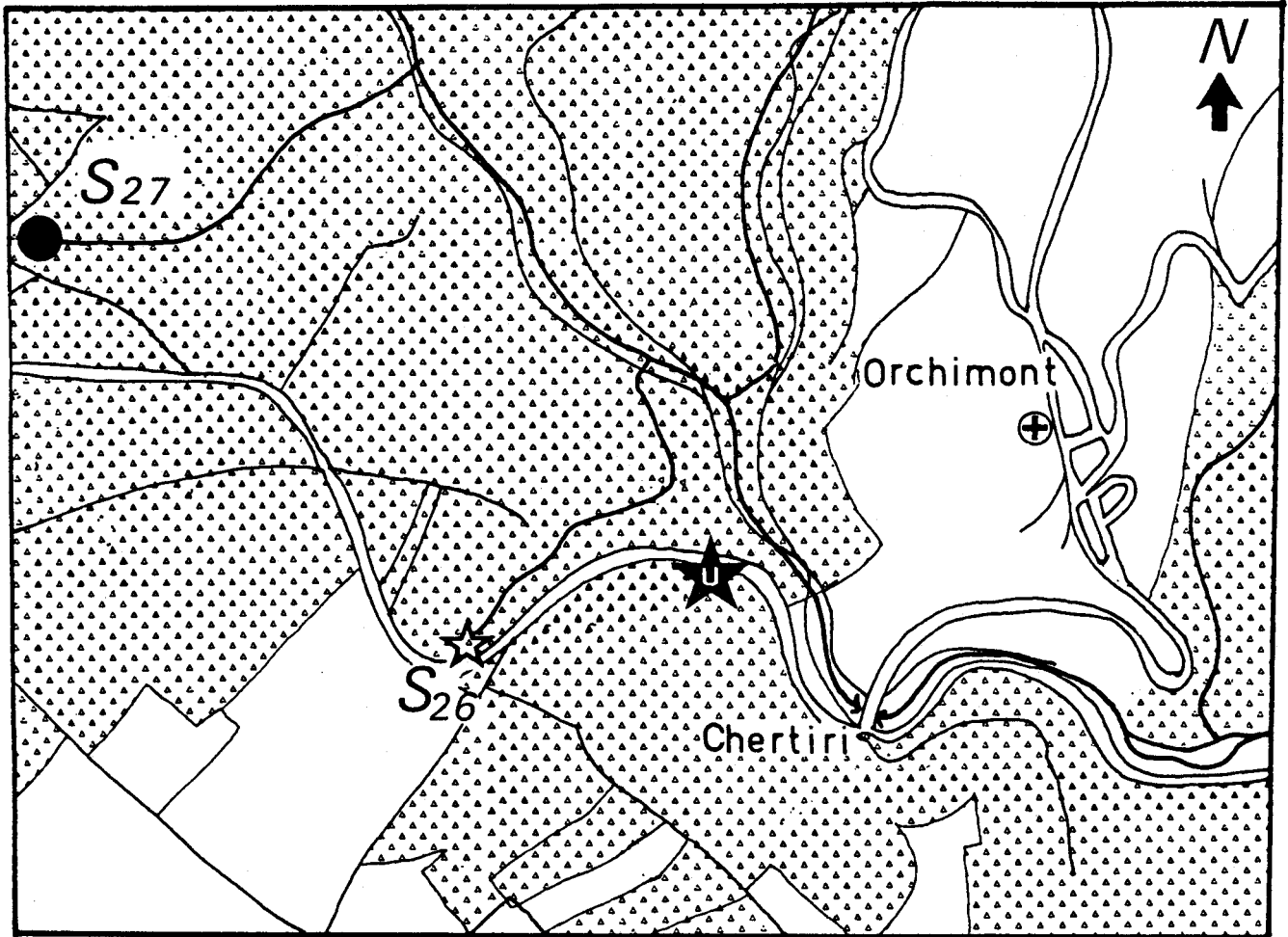
Pour les quatre autres anomalies enregistrées, des choix ont dû être faits. En effet, les moyens techniques et financiers, ainsi que le temps qu'il a été possible de consacrer à ce travail, m'ont conduit à sélectionner ce qui apparaissait comme étant le plus important. Ce qui ne veut pas dire que j'ai perdu de vue la nécessité d'aller plus loin dans l'étude des anomalies que je me contente de répertorier ici.

C'est ainsi que les anomalies d'Oizy et de Monceau ont été étudiées plus en détail que les trois autres sites.

Dans la suite du travail de terrain, les deux sites ont été étudiés comme suit :

- Pour Oizy : application des techniques gaz (émanométrie, Boukoals) et électriques visant à cerner la géométrie de l'anomalie;

- Pour Monceau : émanométrie et spectrométrie gamma *in situ* visant avant toute chose à corroborer l'existence de l'anomalie et à tenter de quantifier les teneurs en Uranium des terrains concernés.



250 m

★ Anomalie en Uranium

☆ Source anormale en Radon

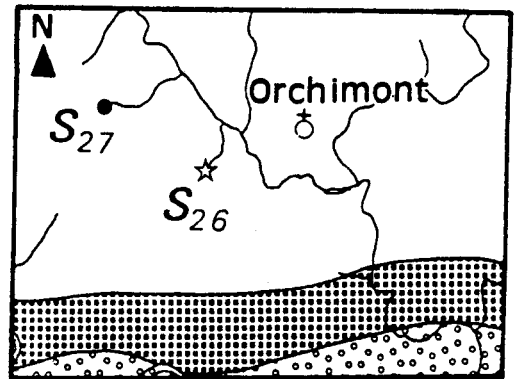
● Source \* Puits

▨ Sapinières

▨ Gédinnien supérieur

▨ Quartzophyllades de Braux

□ Phyllades de Levrézy Géd. inf.



1km

Fig. 40 : Anomalie de CHERTIRI : situation géographique et géologique.

### 2.3. PROSPECTION TACTIQUE

Etude du Radon 222 dans les sols : exemples des anomalies d'Oizy et de Monceau.

#### 2.3.1. Techniques d'étude

Deux techniques ont été principalement utilisées :

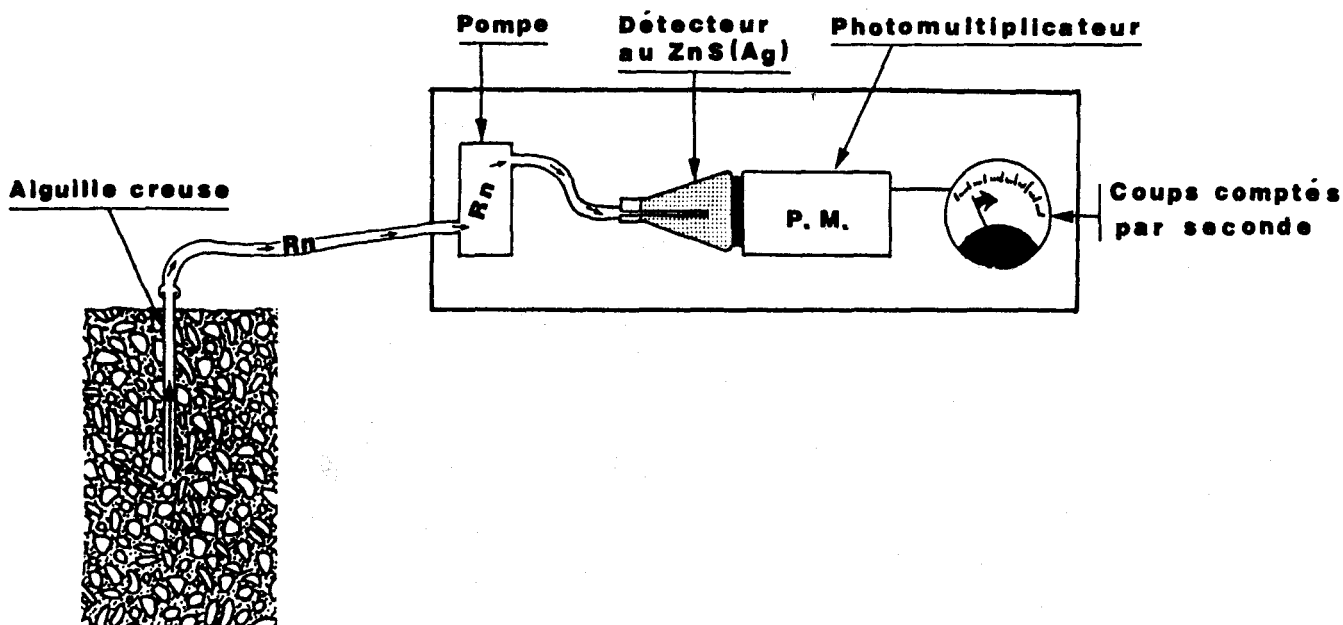
- l'émanométrie,
- l'implantation de détecteurs au charbon actif (Boukoals)

##### 2.3.1.1. Emanométrie

Sur le terrain, j'ai utilisé un émanomètre de type E.P.P. 10 mis au point par le C.E.A.

C'est un mode de mesure ponctuel et instantané des teneurs en Radon du sol. Le principe de mesure est simple (fig. 41) . Une aiguille creuse est enfoncée dans le sol, elle est raccordée à une pompe qui envoie le gaz dans un scintillateur au sulfure de zinc (ZnS (Ag)); ce dernier couplé à un tube photomultiplicateur permet de compter les émissions alpha dues à la désintégration du radon pompé.

fig. 41 : EMANOMETRE (principe)



##### 2.3.1.2. Les détecteurs au charbon actif (boukoals)

J'ai utilisé sur le site d'Oizy des "Boukoals". Ce type de détecteur a été mis au point par Ph. BOUKO\* (1984). Le principe en est simple. Il est constitué d'un pot de verre, à col rodé dans lequel est placé d'une

\* Chercheur au Laboratoire de Minéralogie de la F.P. Ms.

part du charbon actif afin de fixer le radon par adsorption et d'autre part, du Silicagel, dessiccateur absorbant l'humidité ambiante afin de minimiser l'occupation des sites actifs du charbon par l'eau.

En pratique, le pot ouvert est placé au fond d'un trou d'une quarantaine de centimètres de profondeur pendant quinze jours (fig. 42).

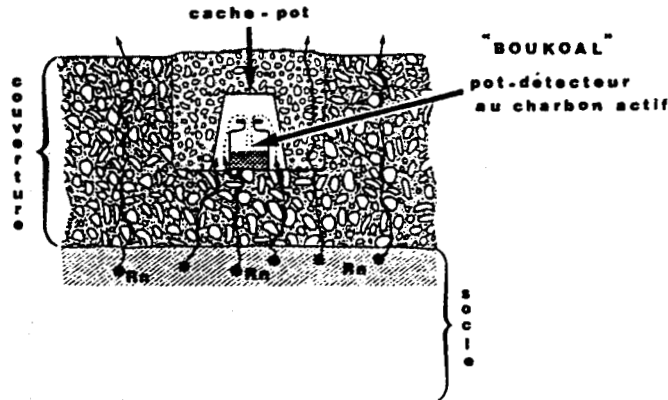


Fig. 42 : Principe de l'implantation des Boukoals

A la fin de cette période, le détecteur est récupéré; on le bouche immédiatement afin d'éviter la désorption du radon.

La mesure de l'activité du pot se fait de la même façon que pour les pots de toluène (§ 2.2.2.2.b). La même chaîne de spectrométrie gamma est utilisée pour doser l'activité des descendants solides du radon : le  $Pb_{214}$ , le  $Bi_{214}$ .

### 2.3.2. Application à l'anomalie d'Oizy

Sur le site d'Oizy, 4 profils ont été réalisés ( fig. 43 )

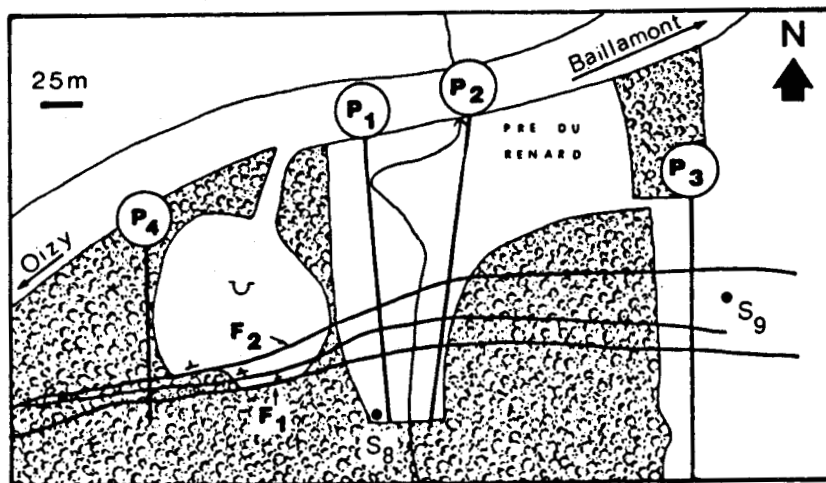


Fig. 43 : Oizy : situation des 4 profils de Boukoals

### 2.3.2.1. Introduction; données de la géophysique

Suite aux diverses prospections radiométriques, le problème était de déterminer l'extension orientale de l'anomalie d'Oizy. En effet, on retrouve l'anomalie de la carrière à l'Ouest dans le talus de la R.O.B. mais à l'Est rien n'est décelé par les scintillomètres. De plus, dans la carrière, on observe des fractures et 2 miroirs de failles porteurs de minéralisations uranifères. La première démarche a été de rechercher le prolongement des failles de la carrière sous les prairies qui s'étendent à l'Est de l'excavation. Pour ce faire, deux profils électriques ont été réalisés suivant les lignes  $P_1$  et  $P_4$ . Le résultat essentiel de ce travail a été de mettre en évidence la prolongation, sous le pré du Renard, des failles  $F_1$  et  $F_2$  (fig. 44 a et b) qui se maintiennent en direction, grossièrement Est-Ouest.

### 2.3.2.2. Les profils Boukoals

Quatre lignes de profil ont été établies :

- . toutes les quatre ont fait l'objet d'implantation de Boukoals,
- . trois d'entre elles ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_4$ ) ont été étudiées en émanométrie.

D'une façon générale, une bonne concordance entre les résultats de l'émanométrie et la technique au charbon actif est observée (fig. 44 et 45). Ceci est en accord avec les résultats de MacLAUGHLIN, CHARLET, DUPUIS, QUINIF, BOUKO et RAMU (1982) qui ont comparé diverses méthodes de détection du Radon dans les formations de couverture.

Le but recherché était : suivre l'anomalie vers l'Est,  
tenter de savoir si les failles ( $F_1$  et  $F_2$ )  
étaient détectables sous la couverture des prés situés à l'Est de la carrière, par cette technique.

Ces objectifs sont atteints dans les limites des méthodes employées.

a) Mise en évidence de la prolongation orientale de la zone faillée

Dans un premier temps, un tandem Profil Electrique - Profil Radon a été utilisé sur les lignes  $P_1$  et  $P_4$  (fig. 44 a et b).

Les profils électriques mettent en évidence l'existence de la zone faillée.

En figure 44 , on constatera la superposition des fortes teneurs en Radon des profils  $P_1$  et  $P_4$  avec la zone faillée. Partant de ce fait, j'ai utilisé les profils Radon comme mode de mise en évidence de failles recherchées. J'ai pu appliquer cette méthode étant donnée la faible importance

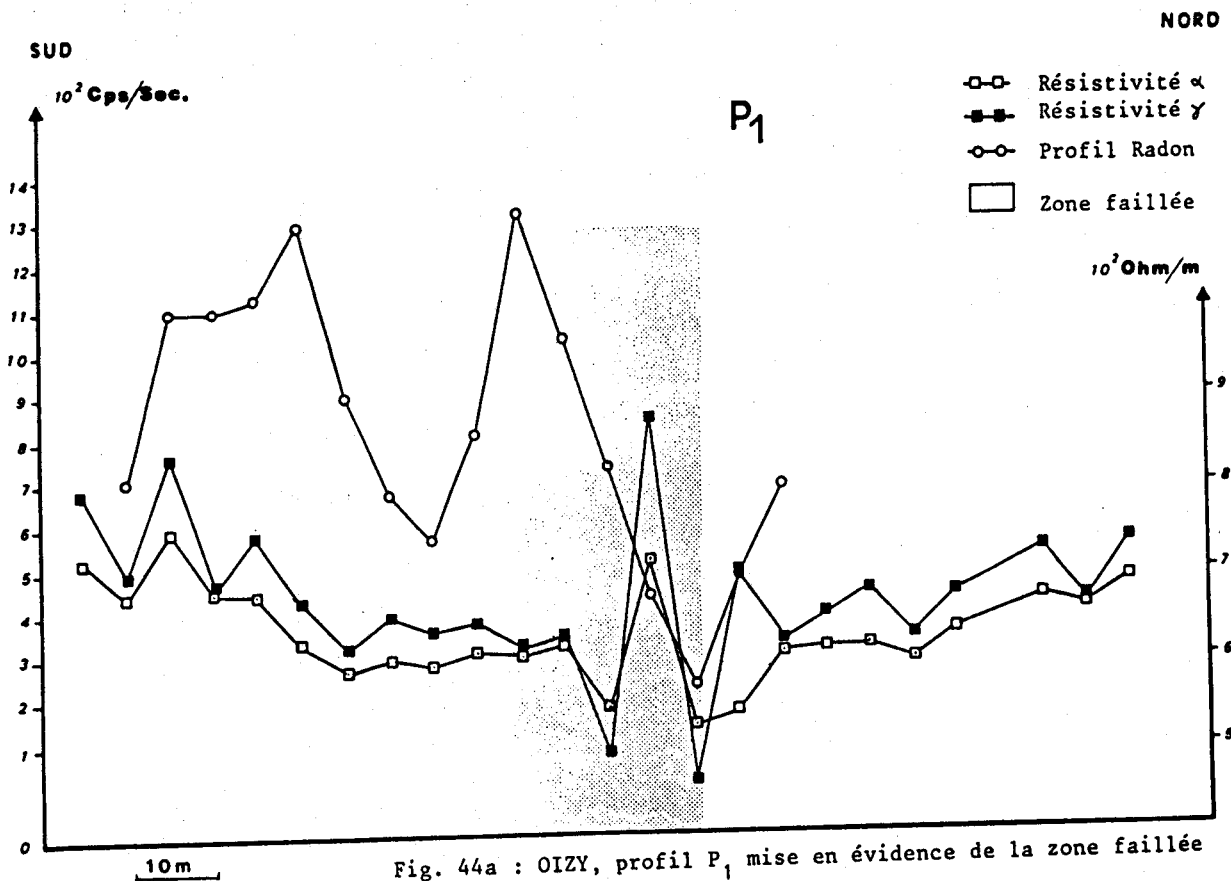


Fig. 44a : OIZY, profil P<sub>1</sub>, mise en évidence de la zone faillée

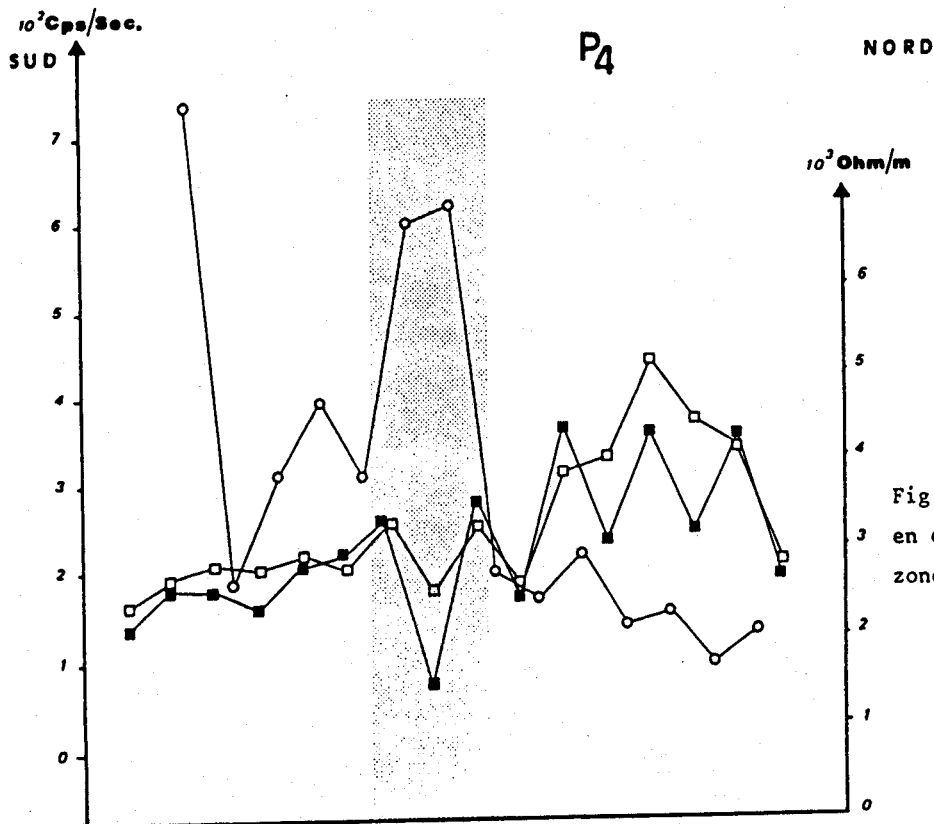


Fig. 44b : OIZY, mise en évidence de la zone faillée.



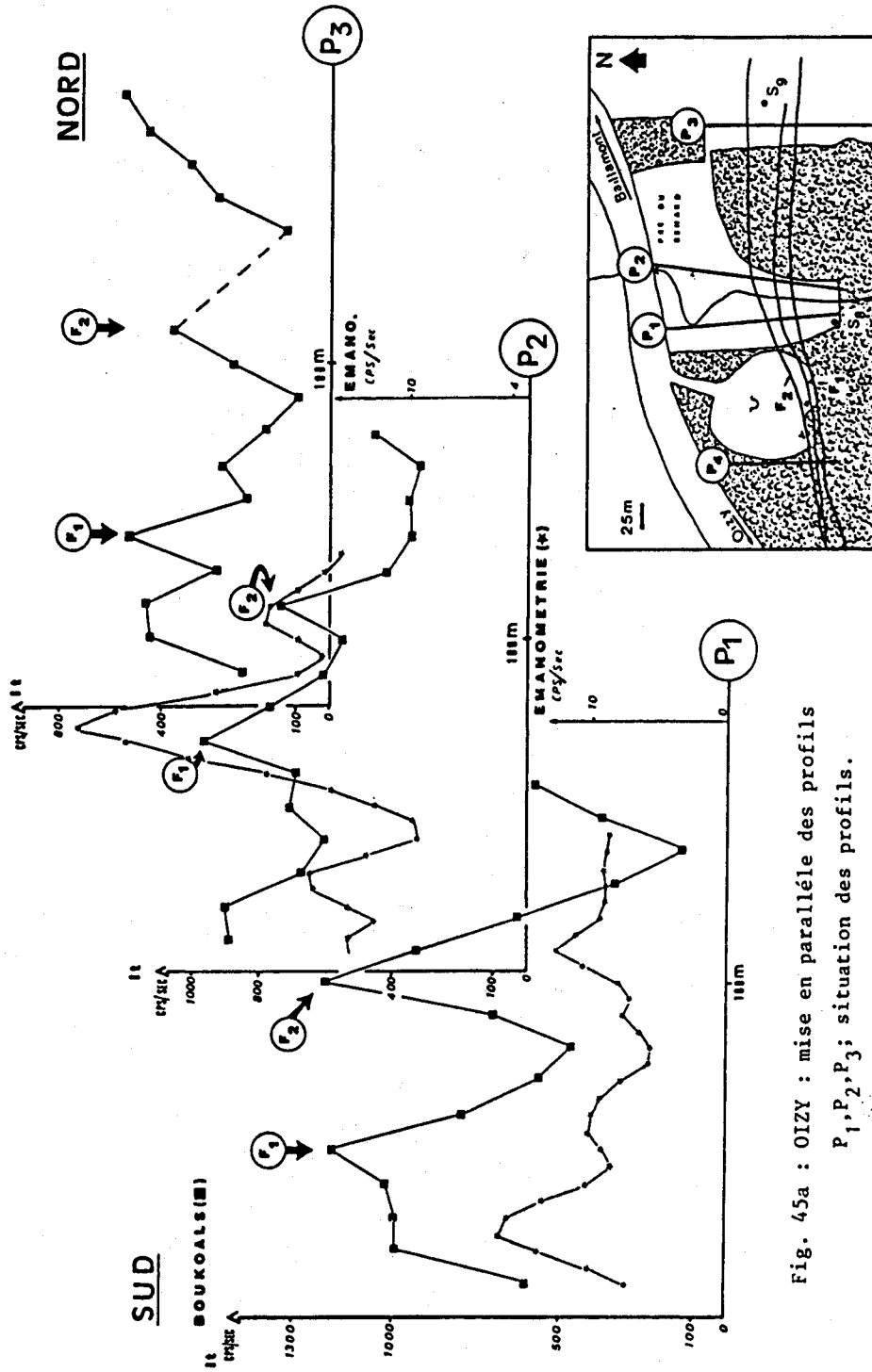


Fig. 45a : OIZY : mise en parallèle des profils  
P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>; situation des profils.

de la couverture dans ce secteur (d'ordre décimétrique à métrique). Ceci implique que les émanations de Radon conduites et/ou induites par les failles et fractures ne subissent pas d'importante dispersion. En figure 45 a et b, je présente les divers profils Radon réalisés à l'Est de la carrière d'Oizy, les pics principaux pourraient correspondre au passage des failles  $F_1$  et  $F_2$ .

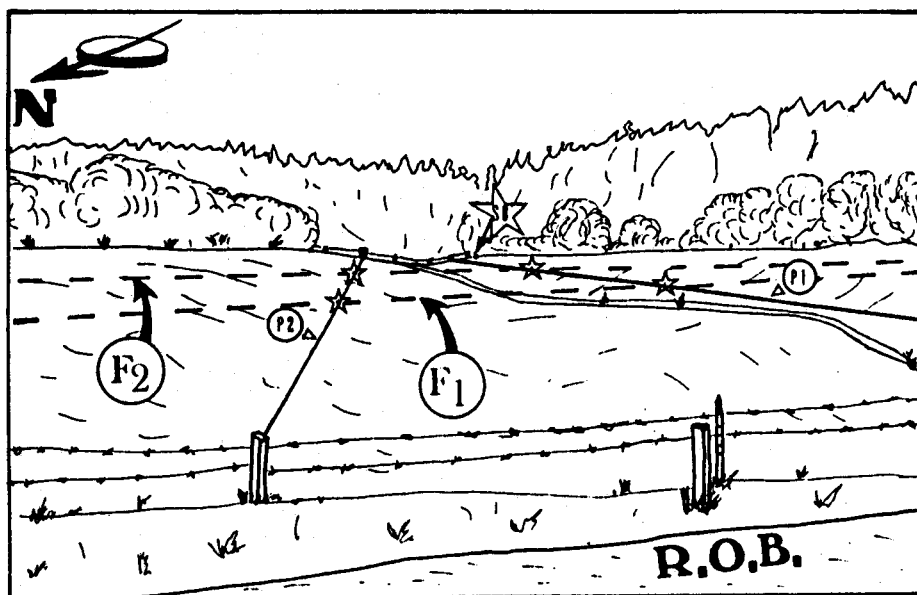


Fig. 45b : OIZY : schéma panoramique du pré du Renard, implantation des profils, passage probable des failles  $F_1$  et  $F_2$ .

b) Extension géographique de l'anomalie d'Oizy

- Apport des "Boukoals".

Je rappelle ici 2 faits bien connus des prospecteurs :

. les gisements d'Uranium n'ont le plus souvent qu'une assez faible extension géographique,

. la prospection par le Radon, *ex abrupto*, a l'inconvénient de surestimer la superficie des gisements.

Pour vérifier la cohérence des mesures réalisées en spectrométrie sur les Boukoals déterrés une corrélation entre l'intégrale totale ( $I_t$ ) du spectre mesuré et l'intégrale du pic à 610 kev ( $I_{610}$ ), du même spectre, correspondant au Bi214 est établie.

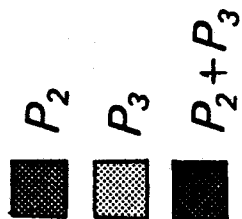
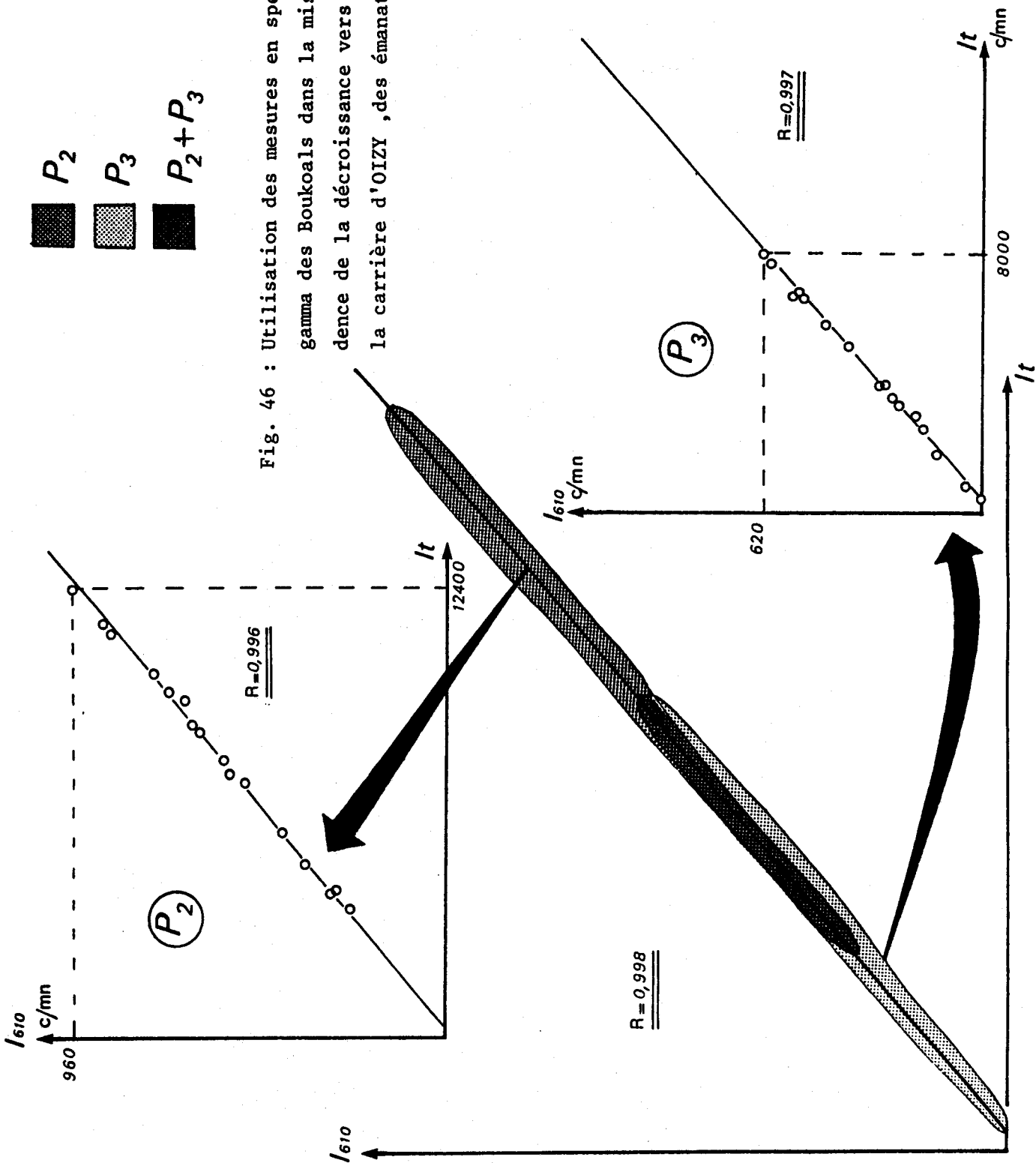


Fig. 46 : Utilisation des mesures en spectrométrie gamma des Boukoals dans la mise en évidence de la décroissance vers l'Est de la carrière d'OIZY, des émanations de Radon



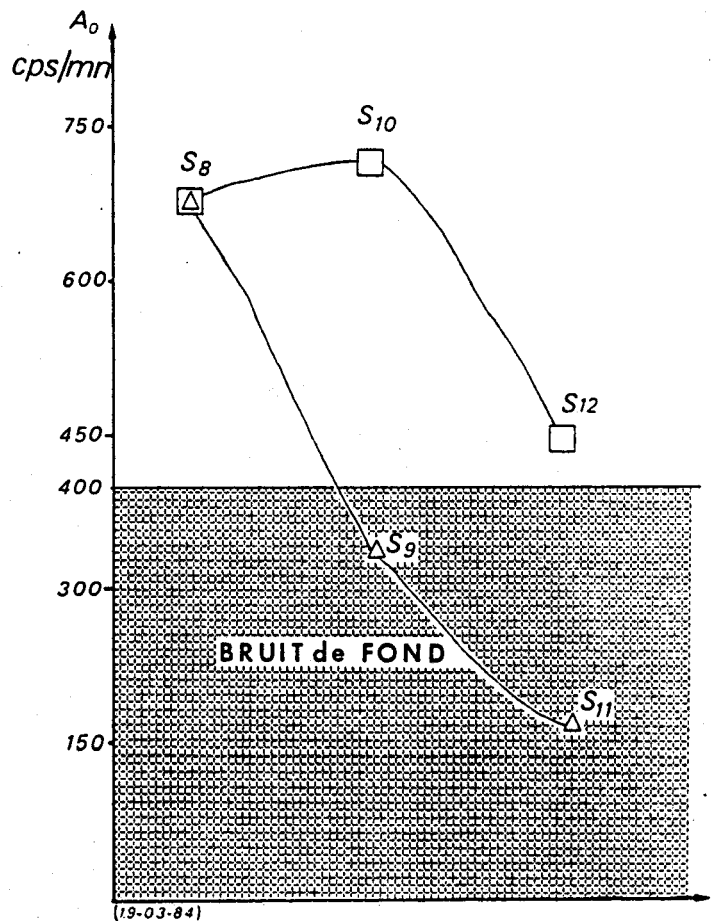
Prenant le cas de 2 profils implantés le même jour et récupérés 15 jours plus tard :  $P_2$  et  $P_3$  (fig. 46) , la corrélation obtenue pour l'ensemble des mesures est de 99,8 %. Poussant plus loin l'analyse de cette courbe, il est possible de distinguer les 2 profils (fig. 46) tout en conservant une excellente corrélation dans les 2 cas. L'ensemble des points appartenant au profil  $P_2$  est situé dans le haut de la droite de corrélation alors que celui des points de  $P_3$  est en bas de la droite. Une telle distinction est la conséquence de la chute des concentrations en Radon lorsqu'on se déplace vers l'Est (fig. 45) .

Le phénomène est sensible en 150 mètres environ. Ajoutées à ce fait, les intensités enregistrées au préalable en  $P_1$  et  $P_4$  permettent de circonscrire les fortes anomalies en Radon immédiatement à l'Est de la carrière d'Oizy (entre le front de carrière et  $P_1$ ). Les failles détectées sont à la fois génératrices et vecteurs du Radon.

#### - Apports de la prospection hydrologique

J'ai écrit en 2-2 que dans le cas d'Oizy, les analyses d'eau de source ont avant tout servi à mettre au point la méthode de prospection. Les résultats obtenus ont été utilisés autrement. Puisqu'un pôle Radon semblait exister au droit de la carrière, que les hasards de l'hydrographie faisaient que je disposais de 2 "lignes" de sources concourantes en  $S_8$ , situés à une cinquantaine de mètres de la carrière, j'ai donc tracé les courbes de la figure 47 . La ligne  $S_8-S_9-S_{11}$  est grossièrement Ouest-Est, la ligne  $S_8-S_{10}-S_{12}$  est Nord-Sud.

Fig.47 : Hydrochimie : mise en évidence du "dome" Radon d'OIZY par les analyses d'eau de source.



(19-03-84)

SOURCES

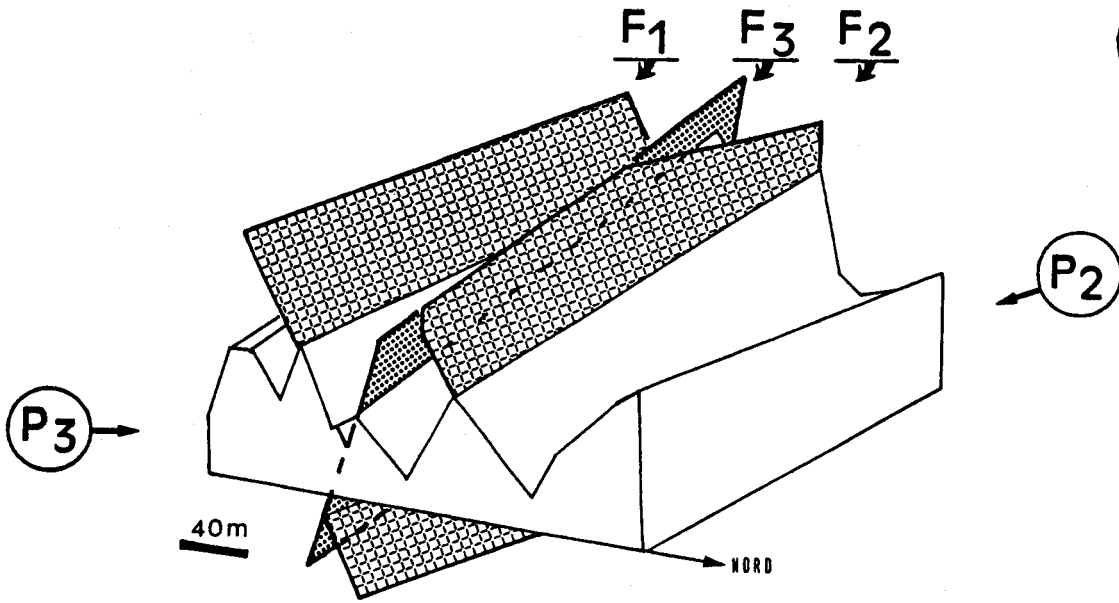


Fig. 48 : Utilisation des profils Boukoals dans l'interprétation tectonique.

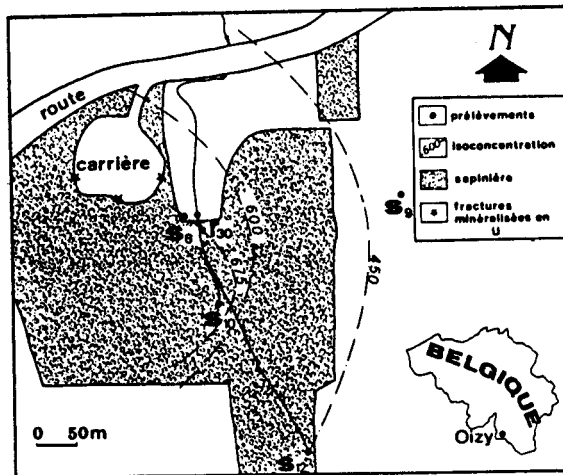


Fig. 49 : Cartographie du "dôme Radon d'OIZY" (in Quinié et al. 1984).

Il est intéressant de noter que les maxima d'intensité sont proches de la carrière (fig. 45) . La nappe superficielle paraît donc porter le même type de message Radon que le sol où avaient été implantés les Boukoals.

Les deux méthodes de prospection du Radon ont détecté le même phénomène : le "Dôme Radon d'Oizy".

### c) Conclusions

Il est net à la vue des divers diagrammes et cartes que l'anomalie d'Oizy se prolonge vers l'Est en direction de Baillamont. Mais les modes de détection employés font que rapidement, elle n'est plus décelable, ceci pour 2 raisons possibles : soit le recouvrement plioquaternaire devient trop important,

soit l'anomalie disparaît.

Pour ce qui est de l'exploitation des résultats, je propose deux exemples pour le site d'Oizy :

- utiliser les profils Radon pour l'interprétation tectonique (fig. 48),
- utiliser les données hydrochimiques pour tracer des courbes d'isoconcentration Radon sur le site (fig. 49).

### 2.3.3. Application à l'anomalie de Monceau

#### 2.3.3.1. Emanométrie

La prospection hydrologique a mis en évidence, à la Fontaine du Pauge une anomalie en Radon (cf. 2.2.3.1.b). Elle est supérieure en intensité à celle d'Oizy, il était donc intéressant de tenter de pousser la prospection plus en avant. Quatre profils émanométriques (fig. 50) ont été faits (ce qui représente 147 points de mesure). L'analyse des données de l'hydrochimie montre que l'anomalie en Radon des eaux de source est centrée entre  $S_{19}$  et  $S_{20}$  (fig. 50).

Les quatre profils réalisés ( fig. 50, 51 et 52 ) montrent les faits essentiels suivants :

- . les teneurs en Radon décelées dans les sols sont plus importantes vers l'Est, vers  $S_{20}$  ( fig. 50, fig. 51 ). Le profil  $P_3$  le montre assez nettement, les profils  $P_1$  et  $P_2$  mis en parallèle illustrent bien ce phénomène.



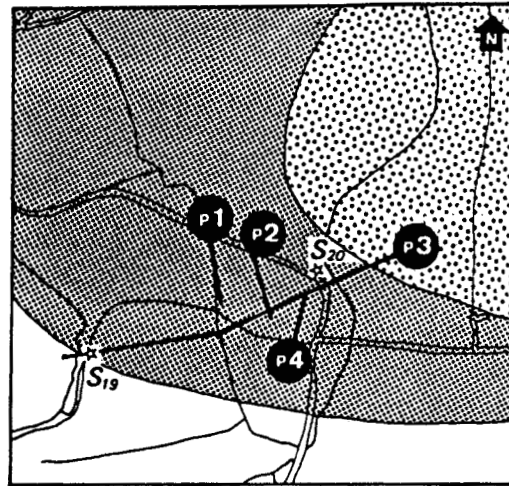
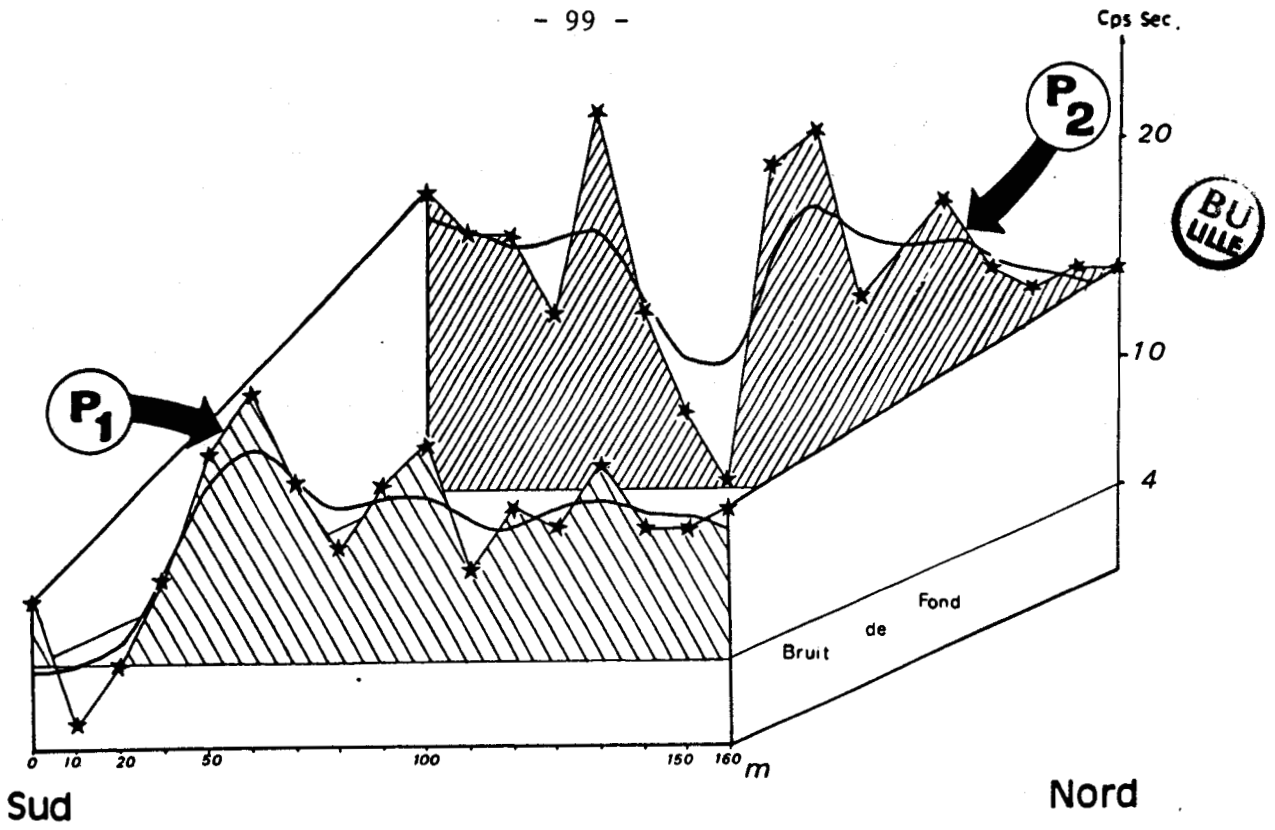


Fig. 50 : Site de MONCEAU : implantation des profils émanométriques, P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>: bloc diagramme montrant l'augmentation des teneurs mesurées lorsque l'on se dirige vers l'Est.

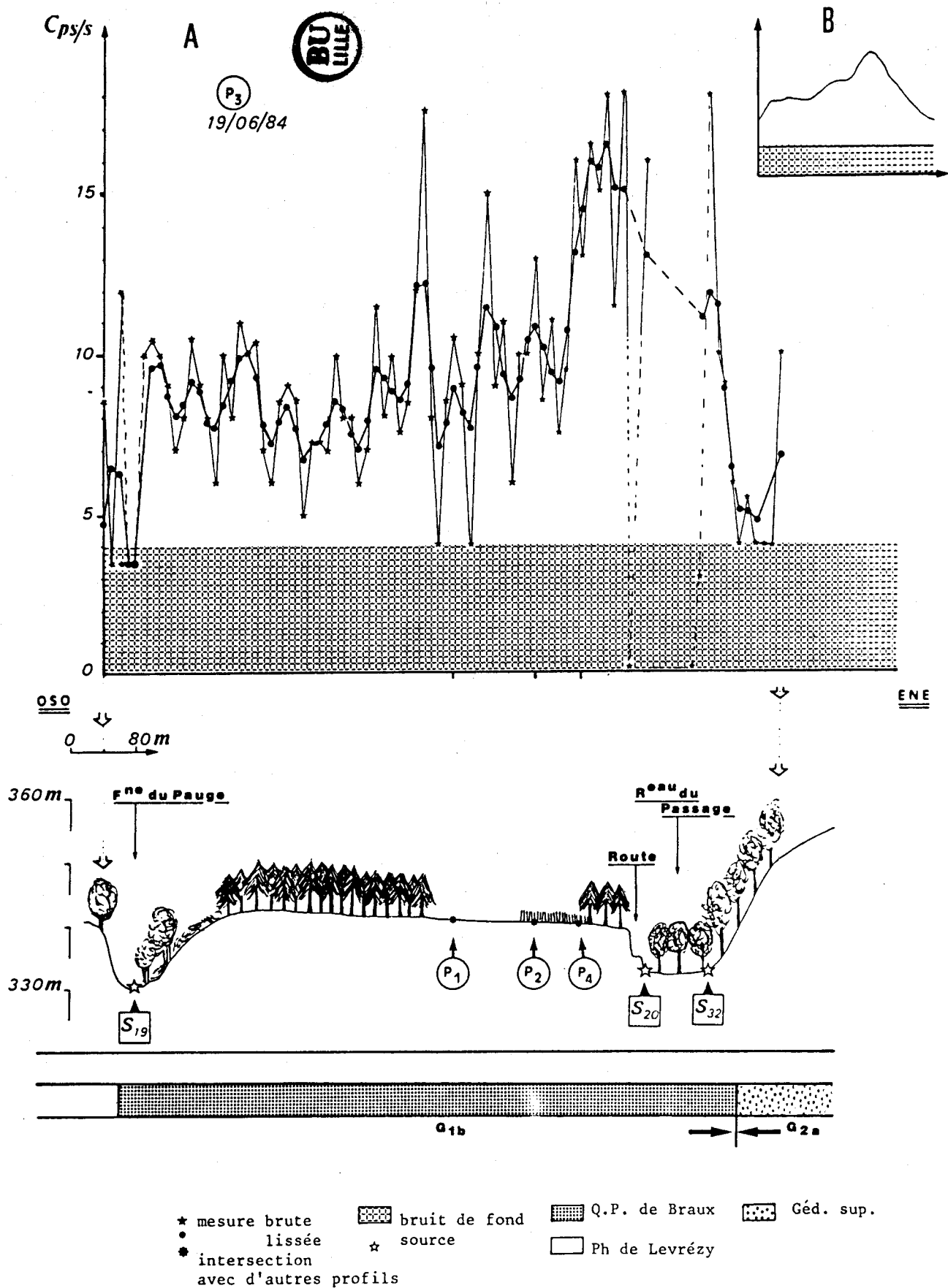


Fig. 51 : MONCEAU : Profil P<sub>3</sub>

. le profil  $P_4$  montre une croissance du Sud vers le Nord de l'intensité des dégagements de Radon.

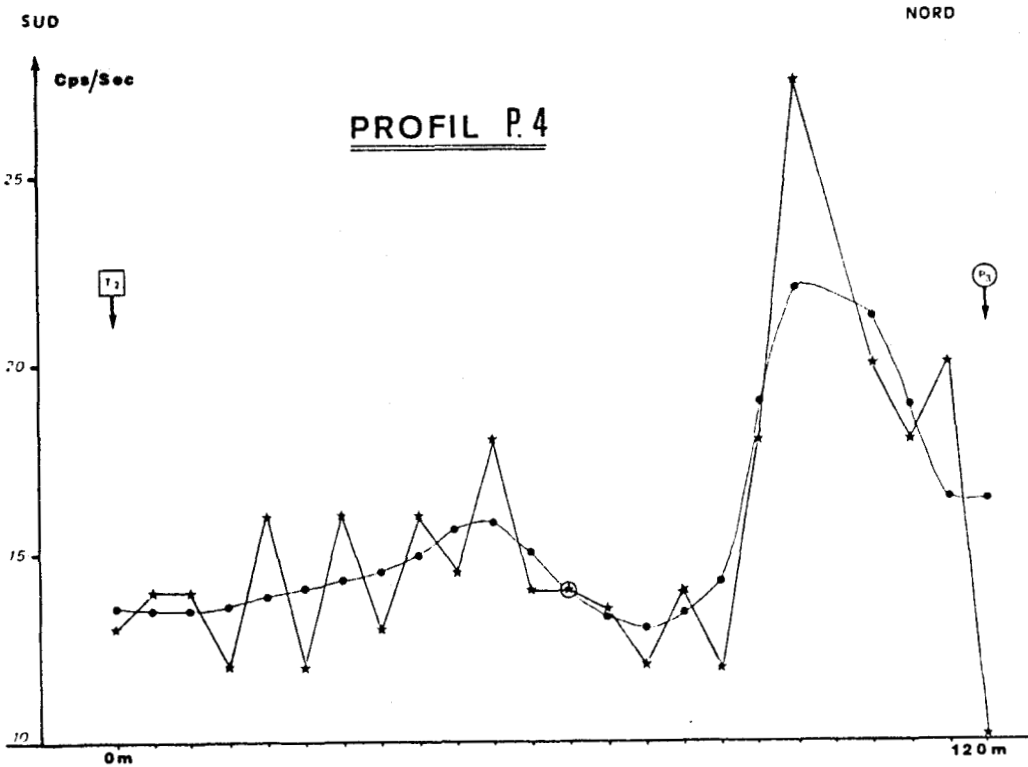


Fig . 52: MONCEAU : Profil  $P_4$

#### 2.3.3.2. Conclusion

Il semble donc, au vu de ces résultats, que la zone la plus riche en Radon de ce secteur est le triangle délimité par  $P_2$ ,  $P_3$  et la route Oizy-Monceau.

Cette zone est donc à choisir préférentiellement pour l'implantation de sondages à la tarière en vue de la réalisation d'essais en spectrométrie gamma "in situ" (voir 3ème partie, Chapitre II).





## CHAPITRE III

INTERPRETATION DES RESULTATS DE LA PROSPECTION  
HYDROLOGIQUE







## CHAPITRE III.- INTERPRETATION DES RESULTATS DE LA PROSPECTION HYDROLOGIQUE

### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, je vais exposer d'une part les résultats et interprétations de quelques expériences réalisées pour tester divers aspects de la méthode d'analyse des descendants de l'Uranium dans les eaux de source élaborée lors de la prospection; d'autre part, les résultats obtenus lors des dix séries de prélèvements montrant qu'il existe des fluctuations dans le temps (cf. 2ème partie, Chapitre II), j'ai tenté d'y trouver une ou plusieurs interprétations. Je présente donc une étude des variations saisonnières mises en relation avec les données de la météorologie.

Le fait d'observer et de mesurer des anomalies en Radon dans les eaux de source ne suffisait pas, mes mesures ne donnaient qu'une idée qualitative de l'amplitude des anomalies. En entrant en contact avec l'Institut d'Hygiène du Ministère de la Santé Publique à Bruxelles, j'ai pu obtenir des résultats quantitatifs sur certaines sources.

Enfin j'évoquerai succinctement les aspects hydrogéologiques du problème et les perspectives d'études conjointes que cette science semble autoriser.

### 3.2. LES FACTEURS DE VARIATION LIES A LA METHODE UTILISEE

#### 3.2.1. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

##### 3.2.1.1. Données bibliographiques

J'ai présenté la méthode de travail en chapitre II de cette partie. Notamment la figure 29 indique les variations des coefficients de partage

$S_1$  : Radon -  $H_2O$ ,

$S_2$  : Radon - Toluène en fonction de la température (STEPHEN *et al.*, 1963).

A partir de ces chiffres, on peut construire les courbes de la figure 53.  $S_1$  et  $S_2$  évoluent subparallèlement.

Il est intéressant de considérer l'évolution du rapport  $R = \frac{S_2}{S_1}$ .  
Il varie de 36 à 55 donc toujours largement en faveur du Toluène.

Considérons la fourchette de température de + 10°C à + 30°C, ces limites peuvent figurer les températures extrêmes auxquelles l'extraction du Radon de l'eau est réalisée au laboratoire. Dans cette fourchette de température, le rapport R varie de 45 à 55 (environ) (fig. 53). J'ai déjà écrit au Chapitre II qu'Yves QUINIF (1984) a mesuré un R de l'ordre de 48 dans les conditions de travail en laboratoire.

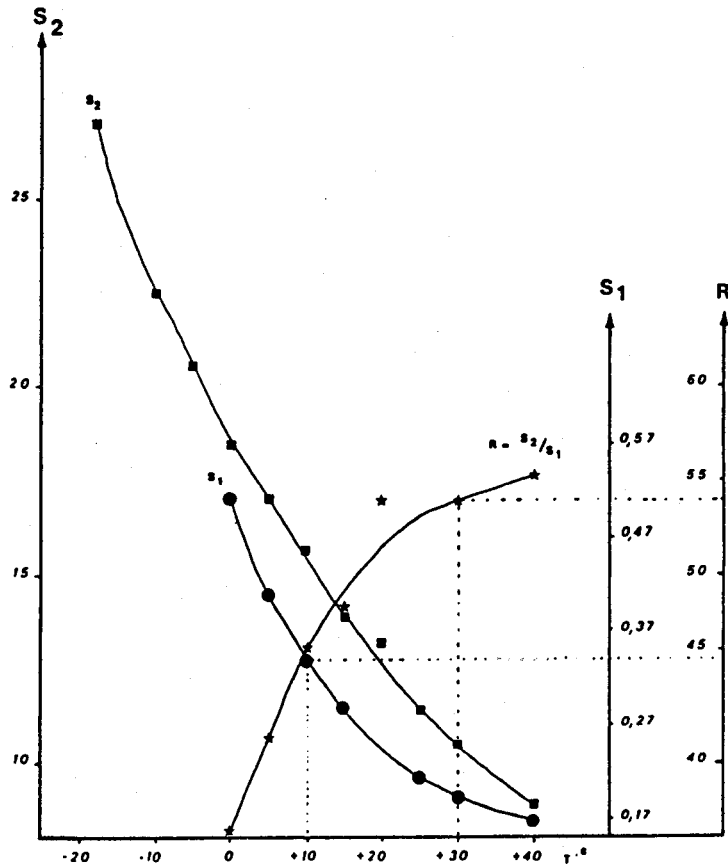
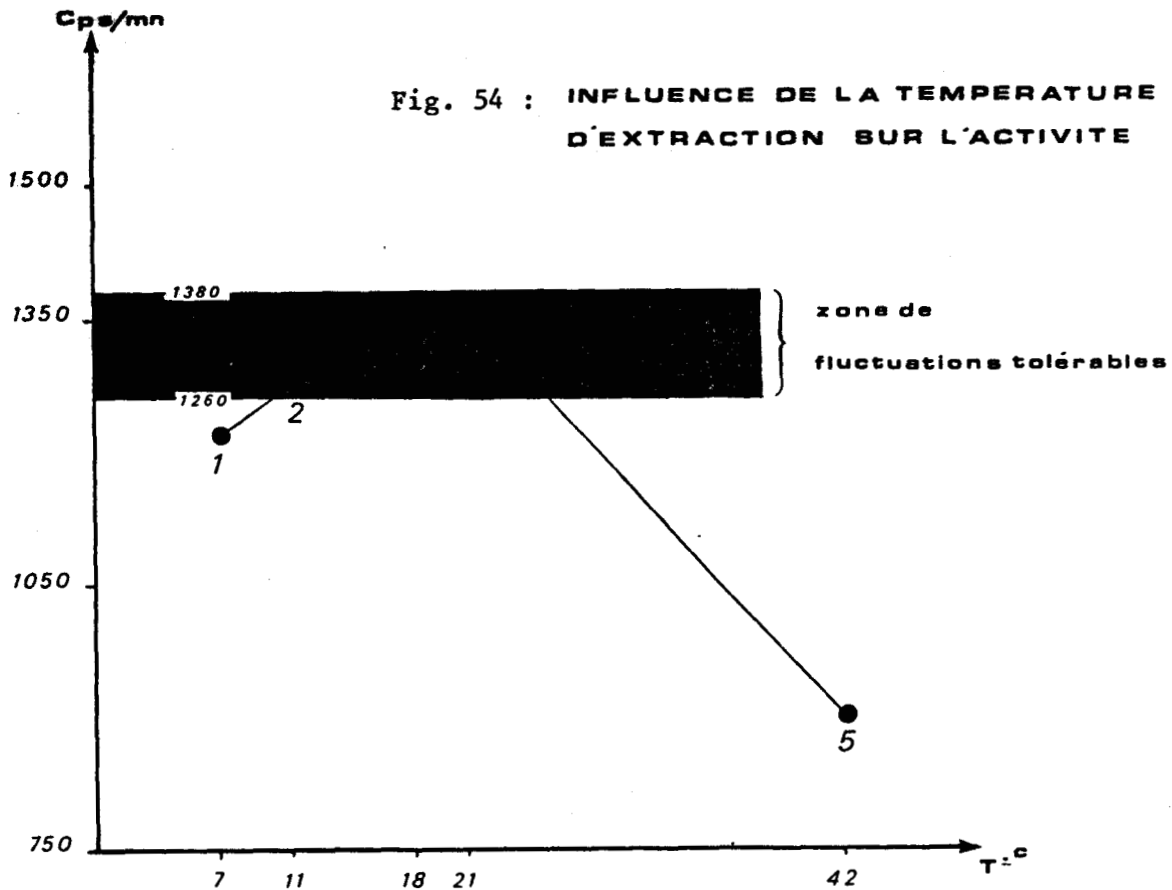


Fig. 53 : évolution des coefficients de partage S<sub>1</sub> (Rn - H<sub>2</sub>O) et S<sub>2</sub> (Rn - Toluène) et du rapport  $R = S_2/S_1$  en fonction de la température

### 3.2.1.2. Données expérimentales

La valeur importante du rapport R permet d'estimer que dans les conditions de température où nous travaillons, la quasi totalité du Radon de l'eau est passée de l'eau au toluène après une demi-journée d'agitation. Cependant, j'ai voulu chiffrer les fluctuations du taux de comptage en fonction de la température d'extraction. Pour ce faire, j'ai réalisé l'expérience suivante, à partir de 5 échantillons de la même source (S 19), prélevés le même jour (fig. 54) :



- 1er stade : avant manipulation, à l'arrivée au laboratoire:
  - . les bouteilles 1 et 2 sont placées au réfrigérateur (+ 4°C) pendant 12 heures (une nuit);
  - . la bouteille 3 est laissée à température ambiante (18°C);
  - . les bouteilles 4 et 5 sont placées en étuve (+ 50°C) pendant 12 heures (une nuit).

- 2ème stade , pendant la manipulation :
  - . la bouteille 1 reste au froid pendant le déroulement des opérations d'extraction, seule l'agitation intermittente est faite hors du réfrigérateur;
  - . la bouteille 2 est placée hors du réfrigérateur pour la réalisation de l'extraction;
  - . la bouteille 3 subit les opérations de routine;
  - . la bouteille 4 est placée hors de l'étuve pour l'extraction;
  - . la bouteille 5 est maintenue en étuve pour l'extraction, l'agitation est faite hors de l'enceinte chauffée.

- 3ème stade : séparation des 2 phases liquides.

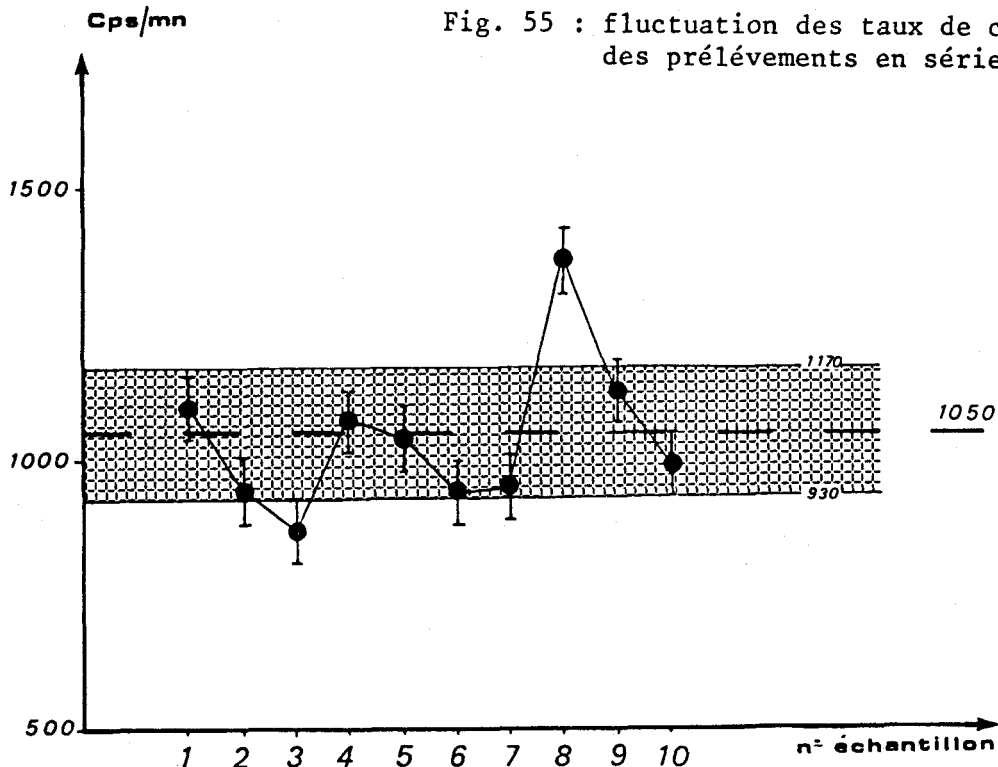
La température du contenu de chaque bouteille est relevée au moment de la séparation de l'eau et du toluène. Les mesures d'activités sont faites classiquement.

La figure 54 donne la représentation graphique des fluctuations enregistrées. Les plus faibles taux de comptage sont ceux mesurés pour les températures extrêmes (+ 7°C et + 42°C). Les trois autres échantillons 2, 3 et 4) dont les températures varient de 11 à 21°C fluctuent de 1260 à 1380 cps/mm . Ceci est tout à fait acceptable.

Pour les expériences suivantes, j'ai donc établi une bande d'incertitude autour de la moyenne des comptages effectués (fig. 55 et 56). Cette bande encadre de +120 à -120 cps/mm la valeur moyenne. Chaque joint de la courbe est figuré par 1 trait (120 cps/mm). Chacun de ces batonnets appartenant totalement ou pour partie à la bande d'incertitude est considéré comme valable.

### 3.2.2. CAS DES PRELEVEMENTS EN SERIE

En routine, un seul litre d'eau est prélevé par source. Pour savoir



comment évolue la teneur en Radon lors d'un échantillonnage multiple, j'ai prélevé, en S 19, 10 litres d'eau.

Le temps de pompage total a été inférieur à 2 minutes. On peut donc estimer, compte-tenu de la durée de vie du Radon, que le prélèvement a été simultané pour les 10 échantillons. Le report des taux de comptage mesurés pour les 10 bouteilles sur un graphique donne la figure 55. Sur les 10 mesures faites, 9 appartiennent à la bande d'incertitude. 10% d'erreur sont tolérables.

Bien évidemment, dans le cadre d'une autre étude, il serait bon d'affiner ces résultats et cette expérience. Ce n'était pas l'objet de mon travail.

### 3.2.3. INFLUENCE DE LA DUREE DE MISE EN PRESENCE DES 2 PHASES LIQUIDES

J'ai tenté de voir sur 2 exemples ( $S_4$  et  $S_8$ ) si, d'une part, la durée de mise en présence de l'eau et du toluène joue un rôle, si d'autre part, le fait d'agiter ou non est important.

J'ai réalisé l'expérience suivante sur deux sources :  $S_4$  et  $S_8$  (fig. 56); j'ai chaque fois pris trois litres d'eau :

. pour les échantillons 1 le toluène a été mise en présence de l'eau dès le prélèvement, mais n'a pas été agité.

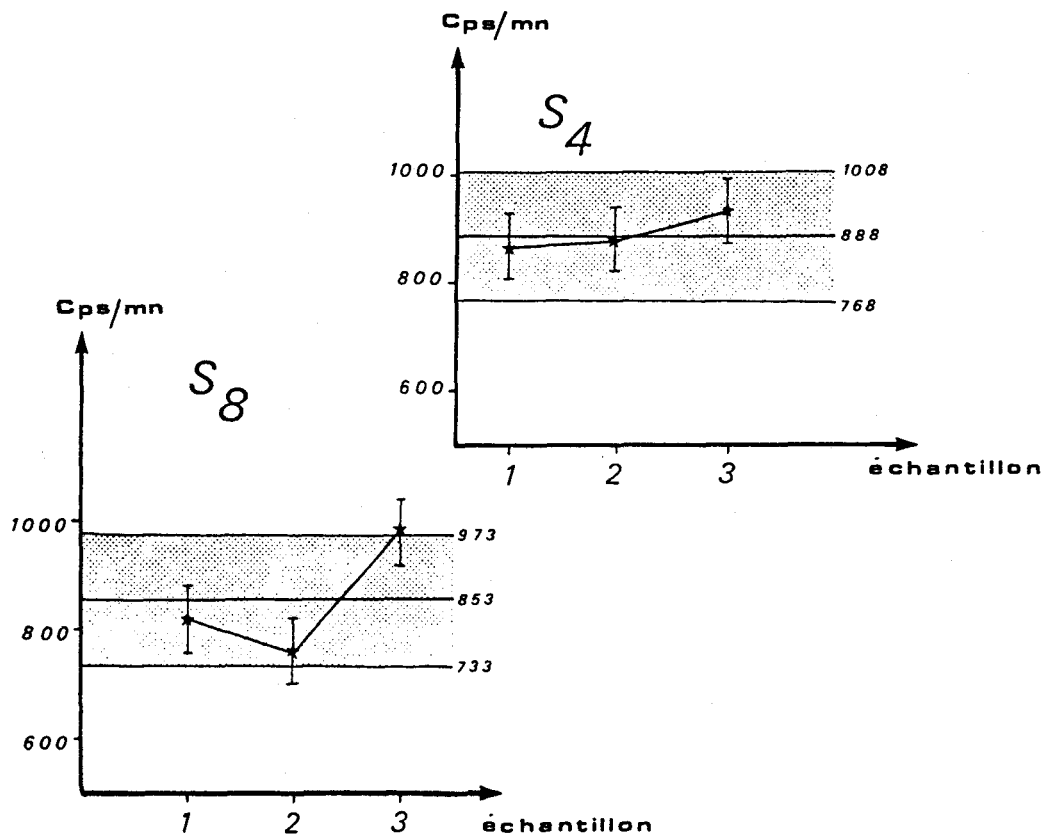


Fig. 56 : influence de la durée de mise en présence des 2 phases liquides sur les taux de comptage. (légende dans le texte)

. les échantillons 2 ont été traités de la même façon mais ils ont été agités.

. les échantillons 3 ont été traités de la façon habituelle.

Les taux de comptage mesurés appartiennent tous à la bande d'incertitude, il n'apparaît donc pas que le temps d'incorporation du toluène, ou que l'absence d'agitation (dans le cas présent) aient une influence notable. Un fait peut retenir l'attention, dans les 2 cas, le plus fort taux de comptage est celui des échantillons 3 (fig. 56). Ceci tendrait à montrer que la technique d'analyse mise au point est la plus performante dans ce cas.

En conclusion, il ne me semble pas utile de préincorporer le toluène dans les récipients de prélèvement. Si malgré tout on choisit de le faire, il serait alors envisageable de supprimer l'agitation. Mais cette possibilité serait à étudier dans le cadre d'un travail basé strictement sur un examen de la méthodologie, ce qui encore une fois n'était pas mon objectif. Sans parler de l'inconvénient pratique qu'impliquerait cette solution au niveau du travail sur le terrain.

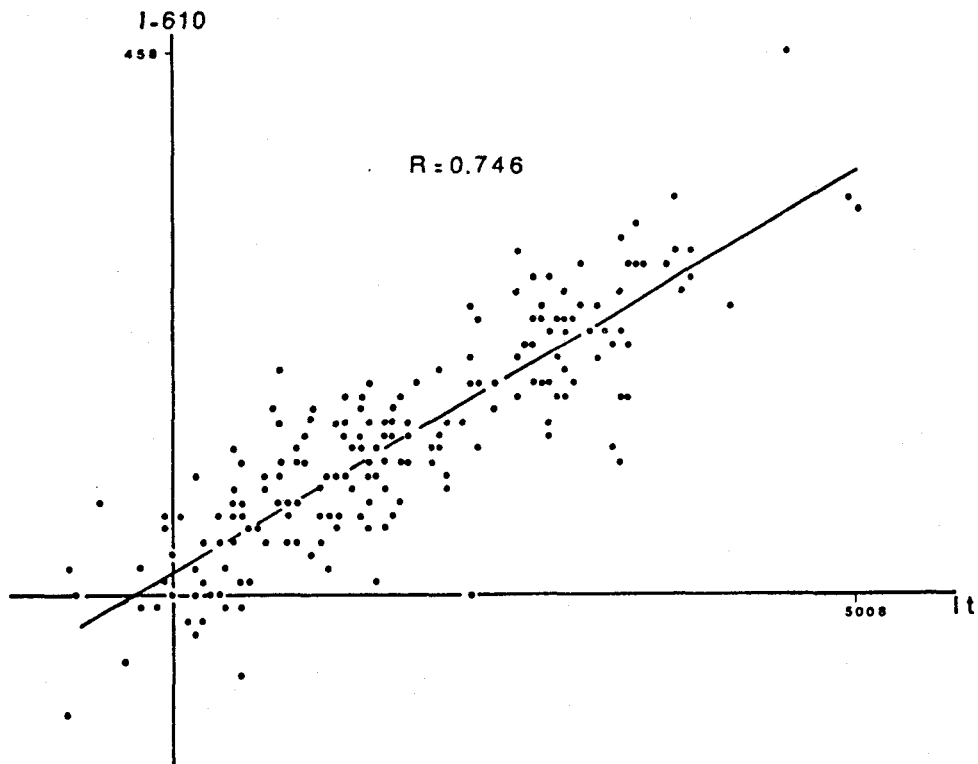


Fig. 57 : Relation It - I610 pour 201 dosages de Radon extrait par le Toluène



### 3.3. HYDROCHIMIE ET CLIMATOLOGIE

#### 3.3.1. INTRODUCTION

Dans ce qui précède, comme dans la suite de ce chapitre, les concentrations en Radon sont établies à partir de l'Intégrale totale (It) du spectre enregistré lors des analyses en spectrométrie gamma. Se limiter à l'interprétation à partir de l'Intégrale du spectre total se justifie du fait de l'existence d'une relation linéaire entre cette It et celle du pic à 610 keV du Bi<sup>214</sup> (fig. 57).

L'objet de ce paragraphe est de discuter des influences potentielles du climat sur les émanations Radon et/ou sur les concentrations relevées dans les eaux de sources. J'ai tenté une approche plus mathématique à partir des renseignements météorologiques en ma possession par Analyse Multivariable (A.M.). Il ne faut toutefois pas perdre de vue que cette analyse ne peut être considérée que comme une ébauche. En effet, il est nécessaire d'étoffer le nombre des mesures afin de lui faire prendre plus de signification.

#### 3.3.2. LES FAITS D'OBSERVATION

Pour suivre l'évolution des concentrations en Radon dans le temps, j'ai tracé les graphiques des figures 58, 59, 60, 61. La constatation déjà faite précédemment (QUINIF, DOREMUS, BOUKO, CHARLET, 1984) peut se répéter ici. Les concentrations Radon des sources étudiées évoluent de la même façon au cours du temps.

Pour la prospection, le fait que les teneurs en Radon fluctuent d'un mois à l'autre, rend indispensable le choix d'une ou plusieurs sources témoins dans chaque zone étudiée. Ainsi pour le présent travail S<sub>1</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>6</sub>, S<sub>8</sub> et S<sub>10</sub> ont servi de témoin lors des campagnes d'échantillonnage.

Dans une première approche, sensitive pourrait-on dire, les variations paraissent attribuables à des facteurs climatiques. En effet, les concentrations en Radon semblent augmenter lors des périodes de relative sécheresse (peu de pluie) alors qu'en période fortement humide elles chutent. Dès à présent, je pense pouvoir avancer que la pluie amène un rapide gonflement de la nappe superficielle, un phénomène de dilution du Radon intervient alors (QUINIF *et al.*, 1984). En fait, tout ceci ne repose que sur des arguments qualitatifs, pour préciser davantage, je me suis intéressé aux données météorologiques de la région étudiée.



Fig. 58 : OIZY : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources et fontaines.

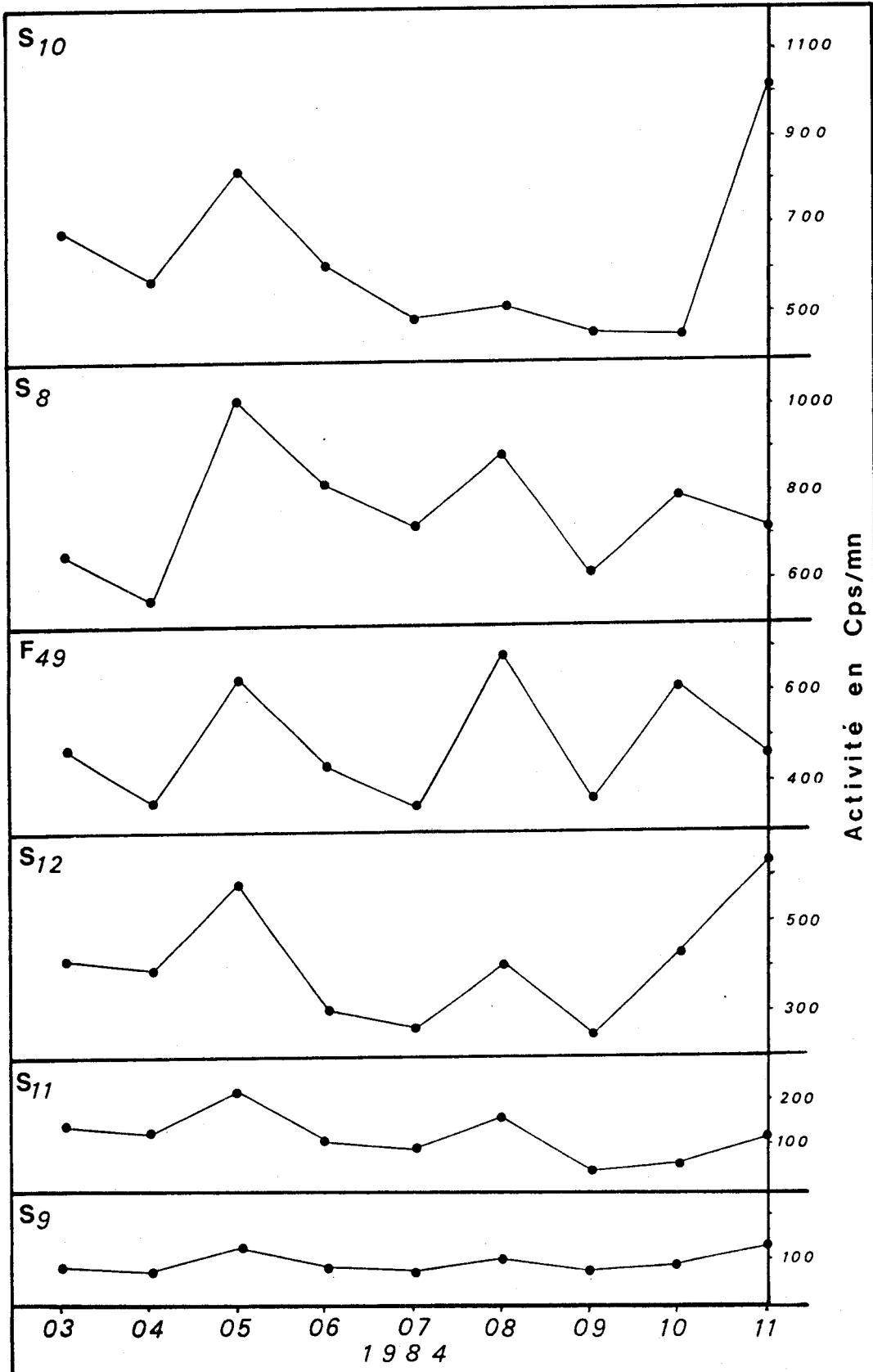


Fig. 59 : MONCEAU  
évolution dans le  
temps des concen-  
trations en Radon  
de 7 sources.

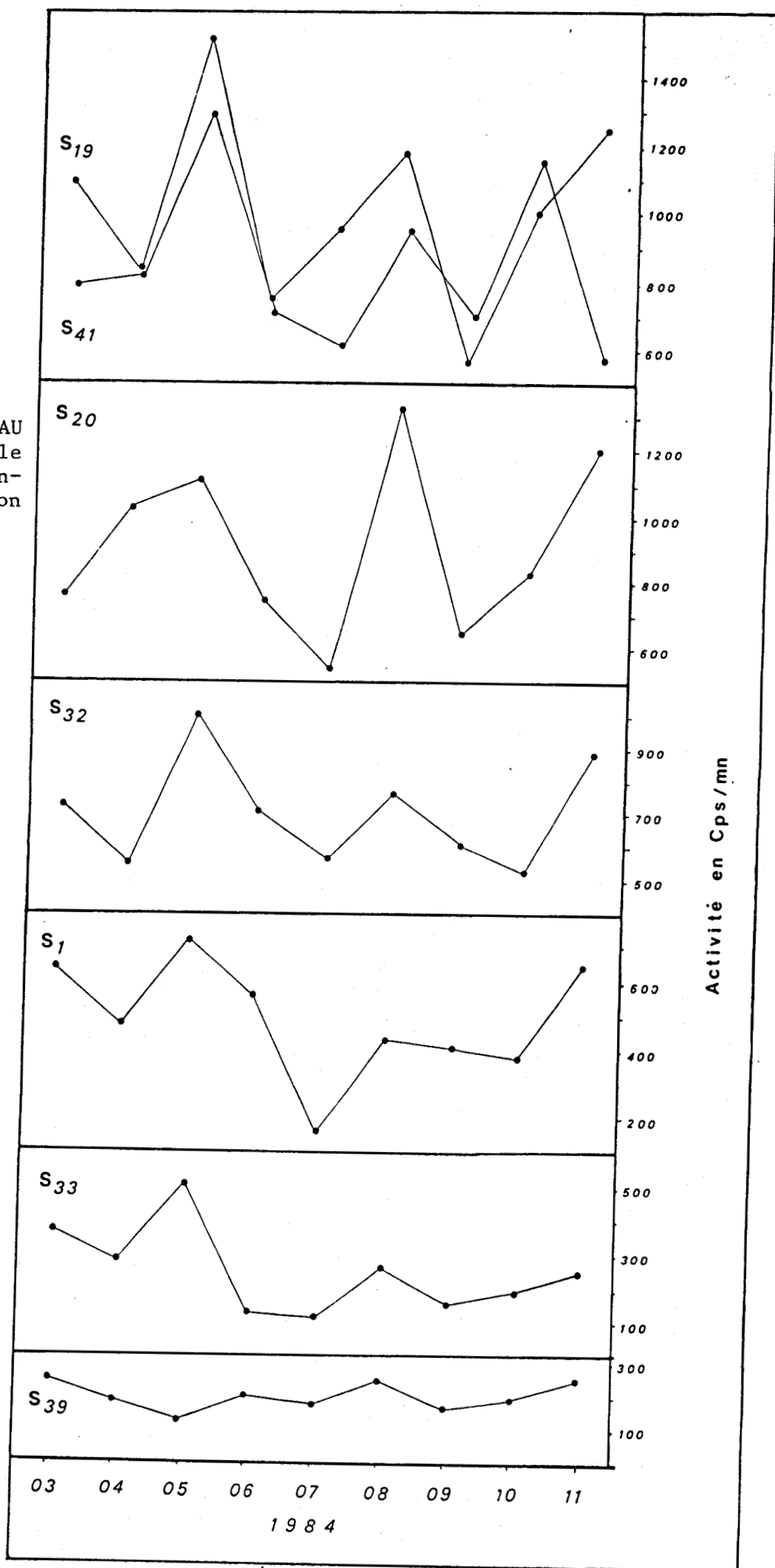




Fig. 60 : Six Planes : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources.

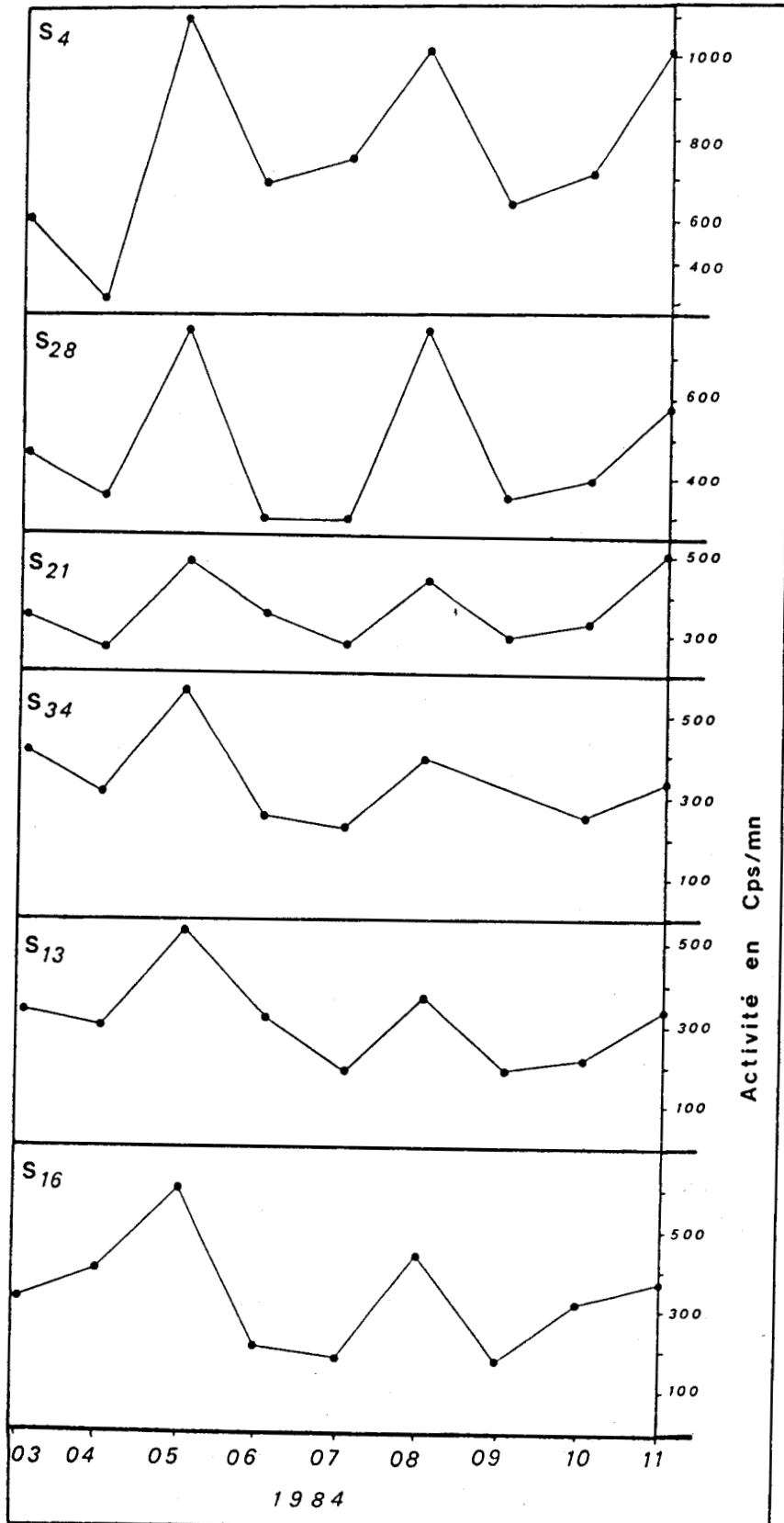
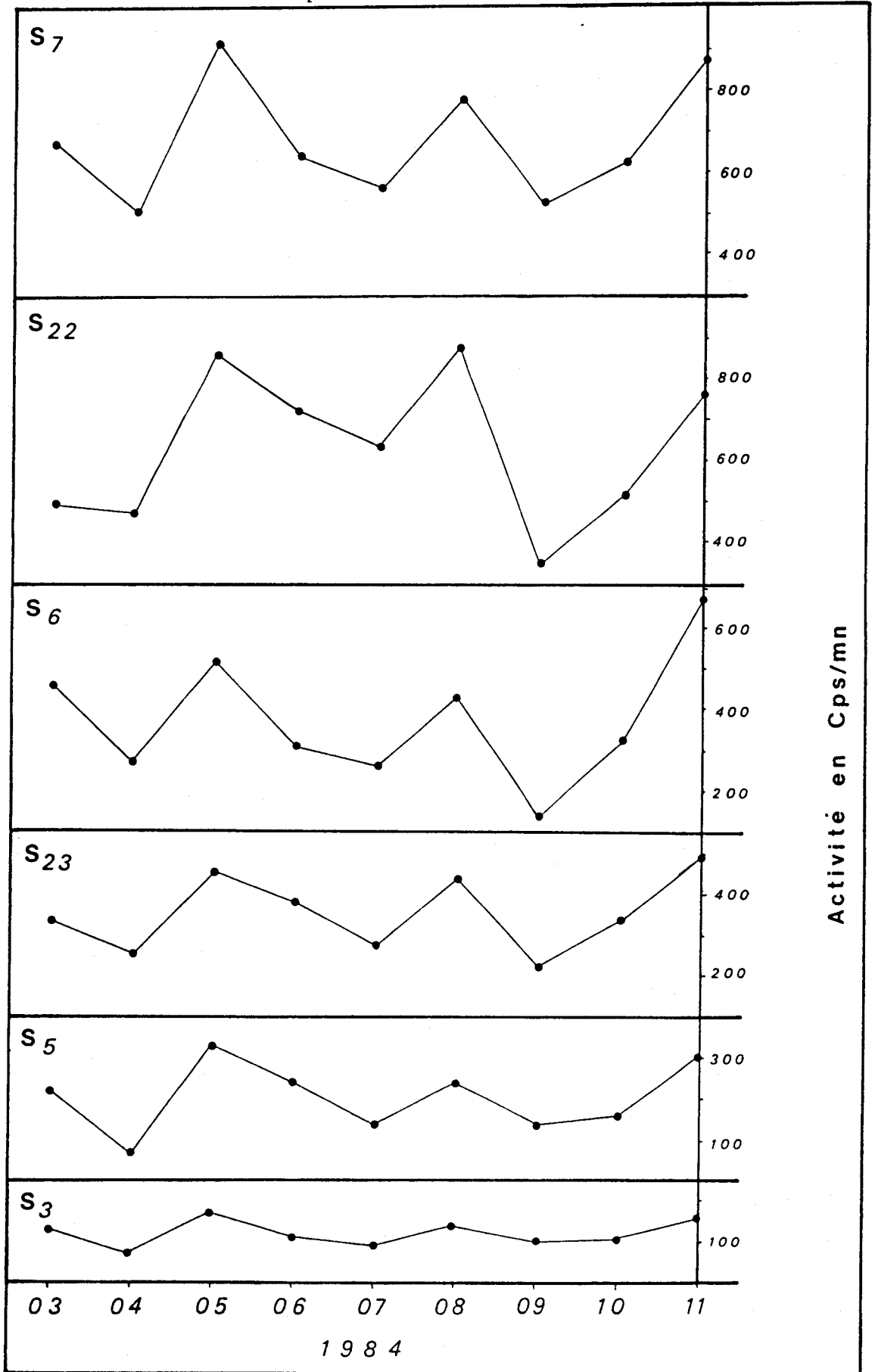


Fig. 61 : Le Rouvelet - Les Maisonnettes : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources.



### 3.3.3 Les données météorologiques

#### 3.3.3.1 Introduction

L'étude des variations des concentrations en Radon devait se faire avec le maximum de données météorologiques provenant de stations peu éloignées du secteur de prospection. Du bulletin de l'Office Royal de Météorologie de Belgique, je tire des renseignements en provenance de Libramont (fig. 62) (Température maximale et minimale, pluviométrie); grâce à l'amabilité de M. BROUSSEMICHE correspondant de la Météorologie Nationale à Charleville-Mézières (France) (fig. 62), j'ai pu, en plus des données précédentes, obtenir des mesures de pression atmosphériques. J'ai utilisé ces renseignements de la façon suivante : la pression atmosphérique, les températures minimales et maximales du jour de la prise d'échantillons, la pluviométrie des trente jours précédant le prélèvement ont été mis en relation avec l'activité des diverses sources.

On a déjà vu en première partie, Chapitre II, que plusieurs auteurs ont mis en évidence certaines relations entre les données météorologiques et les émanations de Radon (KLUSMAN *et al.*, 1981; ODDOU, 1981; SEIDEL, 1982; ODDOU *et al.*, 1983). Je présente dans ce qui suit mes constatations personnelles.

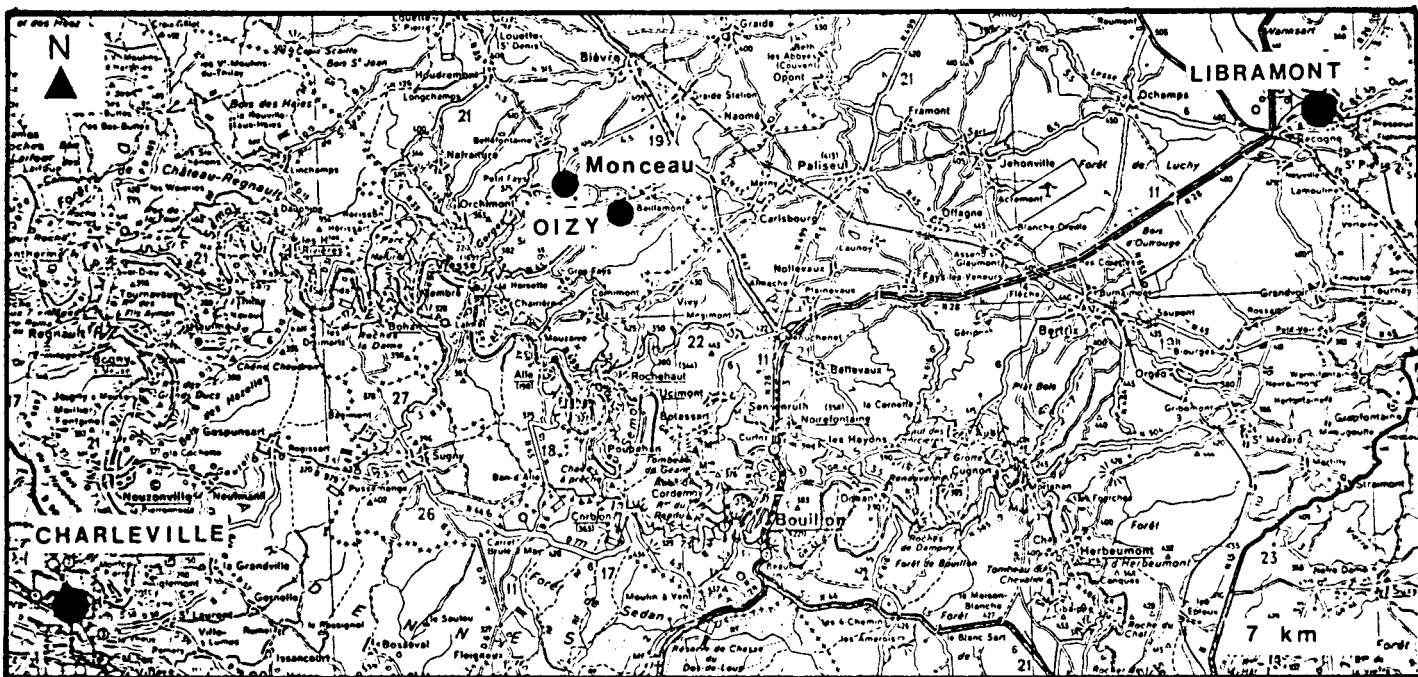
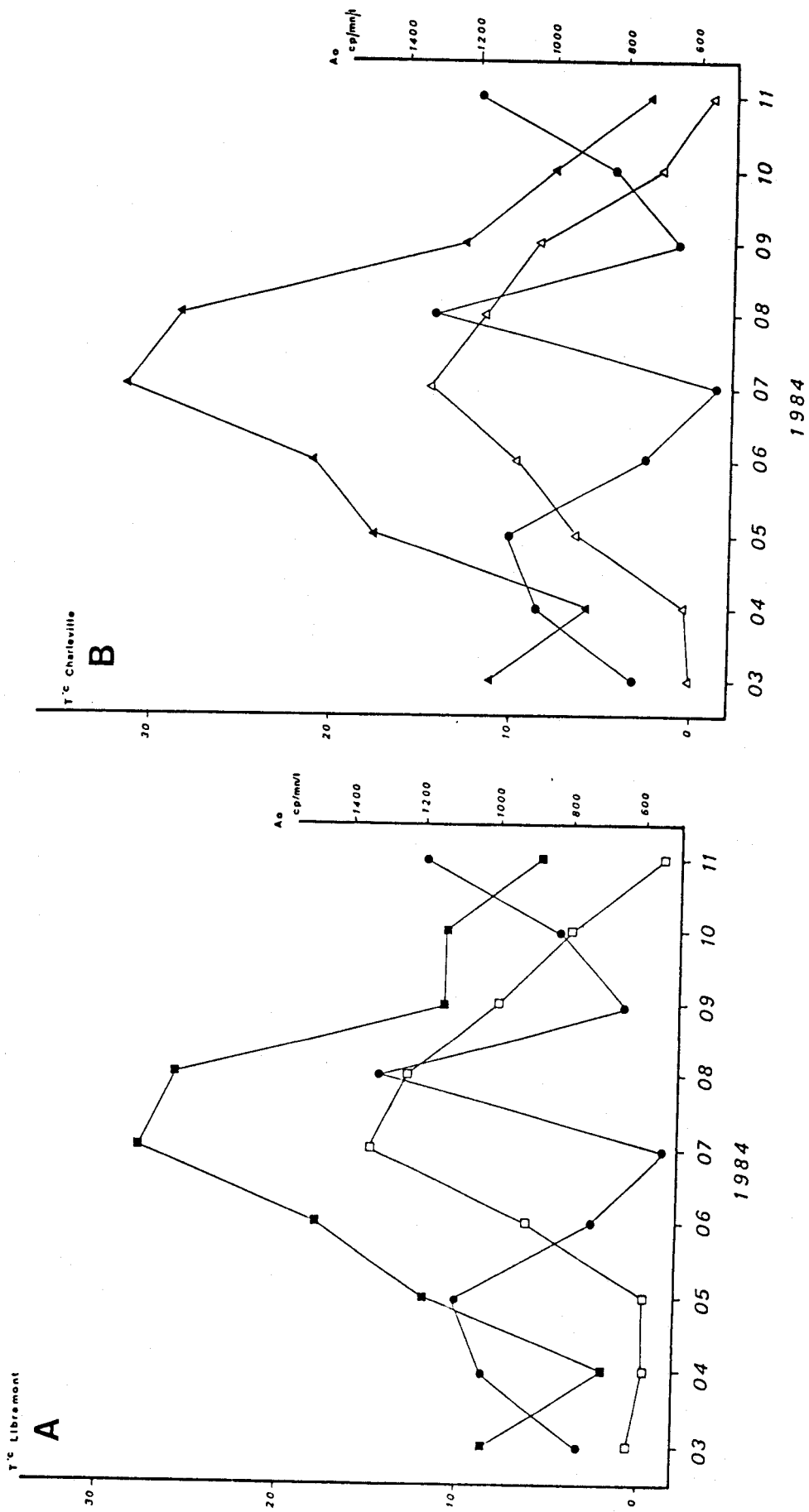


Fig. 62 : Situation des stations météorologiques et des principales anomalies en Radon ( d'après la carte MICHELIN n° 4 de Belgique)





Fig. 63 : Comparaison entre les variations de la Température et les variations des concentrations en Radon (S.20)  
A : LIBRAMONT  
B : CHARLEVILLE-MEZIERES



### 3.3.3.2. La température

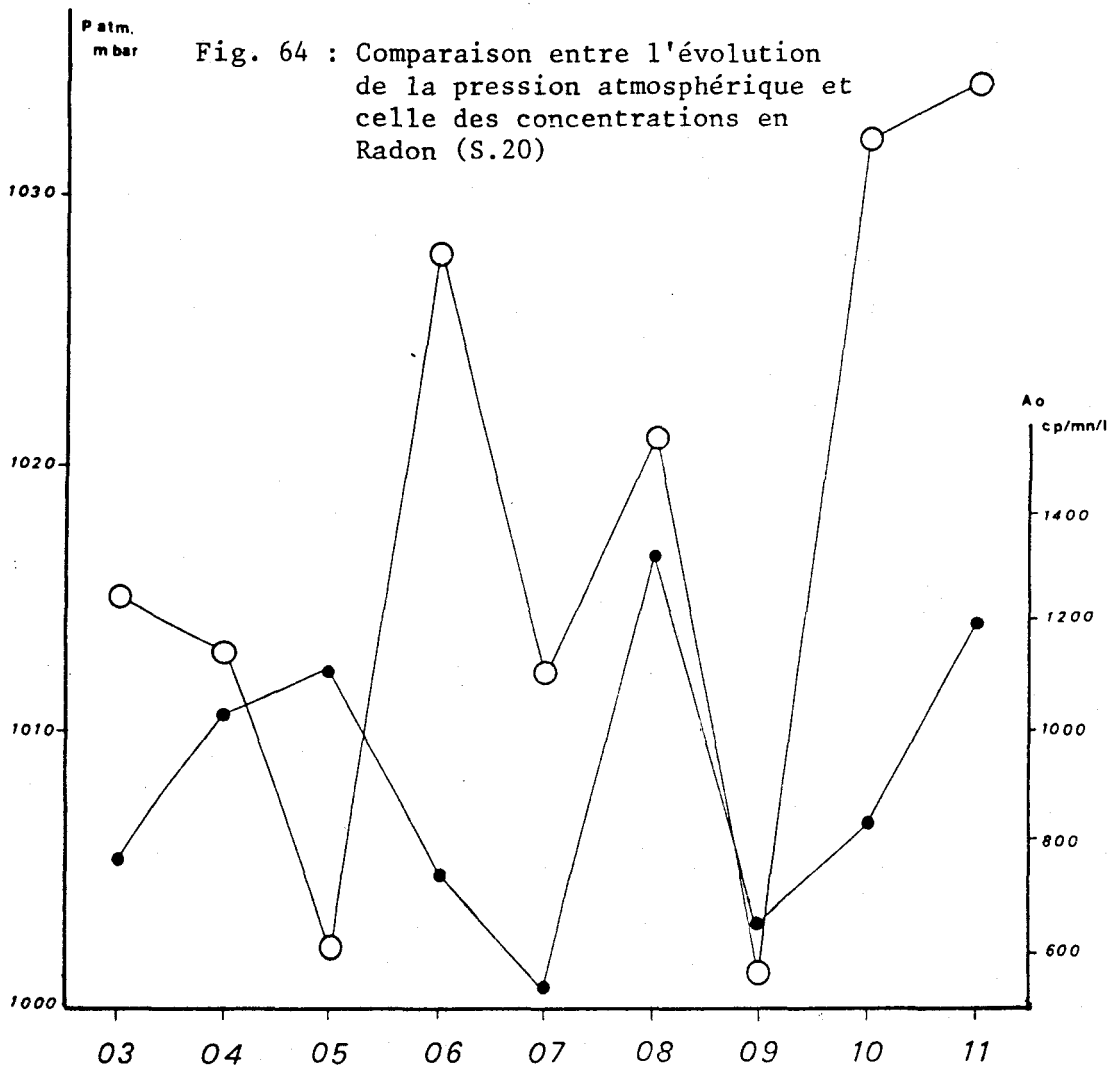
La figure 63 montre l'évolution de la température d'une part à Libramont (fig. 63 A) et d'autre part, à Charleville (fig. 63 B). L'allure des courbes est semblable. Tout au plus, on peut constater que les températures relevées à Libramont sont plus basses qu'à Charleville. Ceci est logique la première station étant située sur les plateaux ardennais alors que la seconde est dans la vallée mosanne.

Par ailleurs, les températures maximales (carrés ou triangles noirs) et minimales (carrés ou triangles clairs) évoluent parallèlement.

Si on compare l'allure de ces courbes avec celle de l'évolution de  $S_{20}$  (ou de toute autre courbe des figures 58 à 61), il ne ressort pas de relation directement perceptible (fig. 63) entre ces deux paramètres ( $T^{\circ}C$  et  $[Rn]$ ). Tout au plus une tendance est discernable : les émissions de Radon paraissent sensibles aux variations de température.

### 3.3.3.3. La pression atmosphérique

Cette mesure n'étant pas faite à Libramont, je n'ai disposé que des mesures de Charleville. Comme précédemment, il n'y a pas de relation



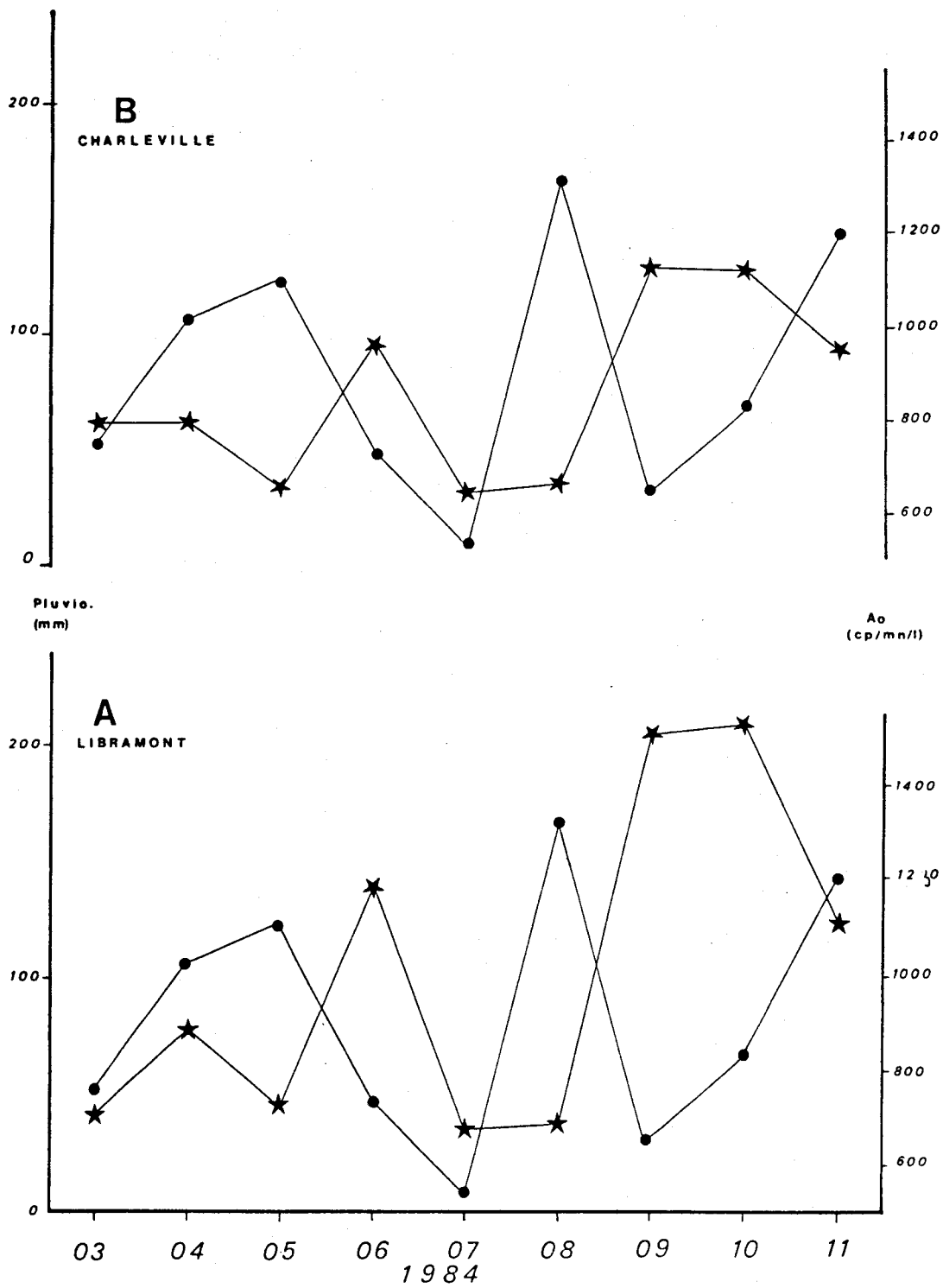


Fig. 65 : Comparaison entre l'évolution de la Pluviométrie celle des concentrations en Radon (S.20)  
A : LIBRAMONT  
B : CHARLEVILLE-MEZIERES

directement perceptible à la lecture de la figure 64. Cependant, de même, que pour KLUSMAN et WEBSTER (1981), il me semble que les tendances d'évolution de la pression atmosphérique et de la concentration en Radon soient antagonistes. Mais ce fait reste à confirmer, la série de mesure étant insuffisante pour affirmer le fait.

D'ailleurs l'évolution de la pluviosité et de pression atmosphérique étant souvent liée, il ne faut pas prendre en compte ce dernier facteur isolément.

#### 3.3.3.4. La pluviométrie

Que l'on utilise les données de Libramont (fig. 65 A) ou de Charleville (fig. 65 B) pour comparer l'évolution de la pluviométrie avec celle des concentrations en Radon, le résultat est le même. Il est, de loin, plus net que tous ceux obtenus précédemment dans cette étude climatologique. Il confirme d'ailleurs les premières impressions. Les teneurs en Radon et les quantités d'eaux tombées dans les 30 jours précédant la prise d'échantillons évoluent de façon antagoniste. En d'autres termes, plus, il y a d'eau météorique qui alimente la nappe superficielle, moins les teneurs en Radon sont fortes. Ceci revient à montrer l'existence d'un phénomène de dilution. En effet, si on admet l'existence d'un dégagement constant de Radon en un ou des endroits baignés par la nappe superficielle les concentrations en Radon de l'eau sont fonction de la quantité d'eau alimentant la nappe et de la distance entre le point de source et celui du dégagement de Radon.

Il est plus que probable que ce facteur n'est pas seul à entrer en action mais d'ors et déjà il est clair que son action n'est pas négligeable.

#### 3.3.3.5. Conclusion

De ce qui précède, seule l'influence de la pluviosité semble nette sur la concentration en Radon de l'eau, mais il est probable que les autres facteurs climatiques présentés ont également une influence du moins indirecte. Afin de tenter de la discerner, j'ai réalisé une analyse multivariante (A.M.), ceci malgré le peu de données en ma possession (9 séries de mesures). Mon but était de poser un jalon dans une direction qui me paraissait intéressante.

#### 3.3.4. TRAITEMENT DES DONNEES PAR ANALYSE MULTIVARIABLE (A.M.)

##### 3.3.4.1. Introduction

Le nombre des variables à prendre en compte, le fait que les données météorologiques ont des interactions, m'ont amené à tenter ce type

d'analyse. Ce dernier permet de préciser le comportement de diverses variables les unes par rapport aux autres. Ainsi on peut obtenir une vision synthétique et générale des phénomènes dans un espace multidimensionnel. Le tout est plus représentatif qu'une corrélation linéaire. D'après HERBOSCH (1974), ce type d'analyse est un mode exploratoire, créateur d'hypothèses grâce à l'interprétation des facteurs. Un facteur est un ensemble de variables possédant des relations entre elles.

#### 3.3.4.2. Généralités sur l'A.M.

Je citerai ici ce qu'écrit L. DORCHIES (1984) sur l'analyse factorielle (ou A.M.) :

"Le point de départ de toute analyse factorielle est une matrice de données de dimensions  $n \times N$ , où  $n$  correspond au nombre de variables mesurées sur  $N$  échantillons. L'objectif de cette analyse est d'extraire sous une forme condensée, la plus grande part possible de l'information contenue dans la matrice de données.

Elle détermine les relations entre les variables et entre les échantillons. Pour cela, elle effectue des classifications ou des regroupements au niveau des variables et des échantillons sur base de leurs coefficients de corrélation mutuels. Il est alors possible de définir pour chacun des groupes de la classification ainsi formée, une variation théorique plus générale appelée facteur ou "super-variable" (LECOMPTE, 1975). Les facteurs sont fonction linéaire des variables initiales, en nombre très inférieur à celles-ci et suffisent à expliquer un pourcentage élevé de l'information initiale. Ils sont interprétés en termes de processus géologiques ou géochimiques, mettant ainsi en évidence des phénomènes plus ou moins fondamentaux ayant influencé le comportement des variables.

En outre, l'analyse factorielle permet une représentation spatiale des classifications ou des regroupements élaborés. Le lecteur soucieux de plus de précisions pourra consulter HERBOSCH (1974), LECOMPTE (1975)."

#### 3.3.4.3. Application

Dans un premier temps, j'ai analysé en A.M. l'ensemble des échantillons collectés (190). A partir des résultats obtenus, choisis sur un certain nombre de sources, j'ai réalisé une A.M. pour chacune d'entre elles.

##### a) Analyse multivariable des 190 échantillons

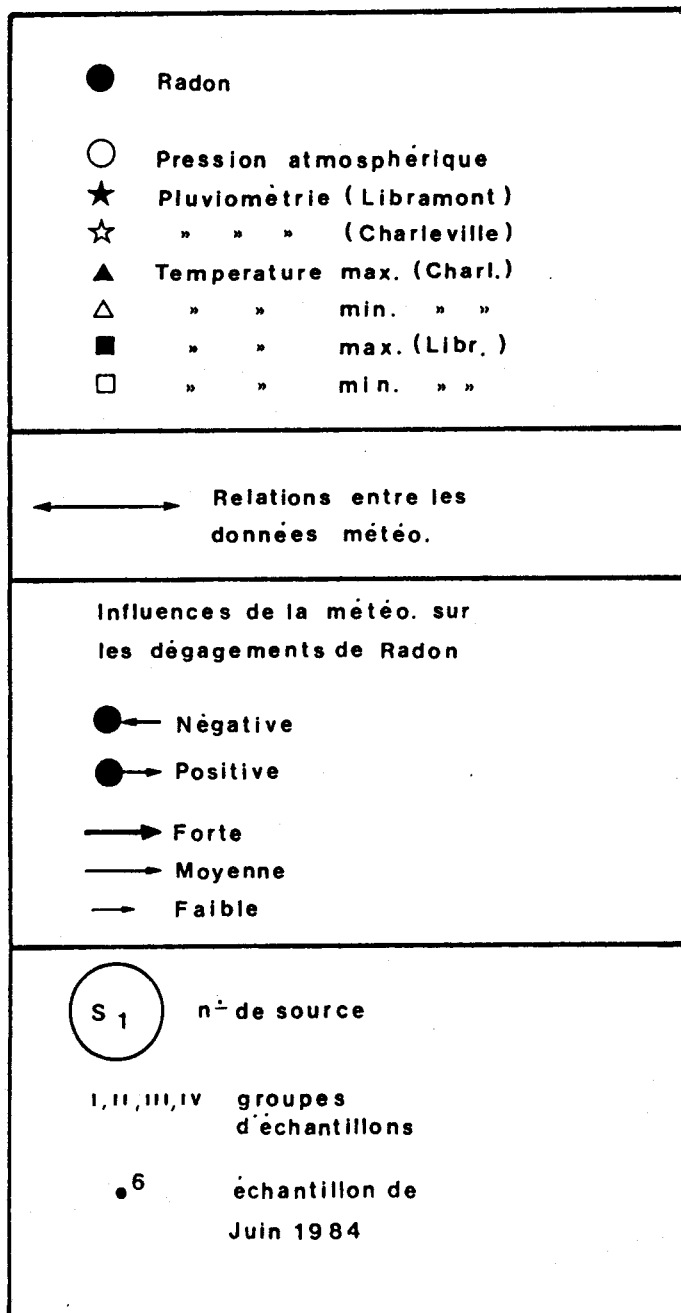
6 facteurs sont apparus, seuls 2 d'entre eux sont pris en considération (F1 et F2) car ils regroupent 75,68 % de l'information (fig.66 et 67).

De cette analyse, on peut retirer que les températures sont bien corrélées entre elles de même que les pluviométries. Donc les stations de Libramont et Charleville sont également représentatives des variations climatiques régionales. La pression atmosphérique est assez bien corrélée avec la pluviométrie, la relation avec la température est moins bonne.

Le plus intéressant était de savoir comment se comporte l'activité Radon des eaux de sources (Ao) vis à vis de l'ensemble des données météorologiques (fig. 66a).

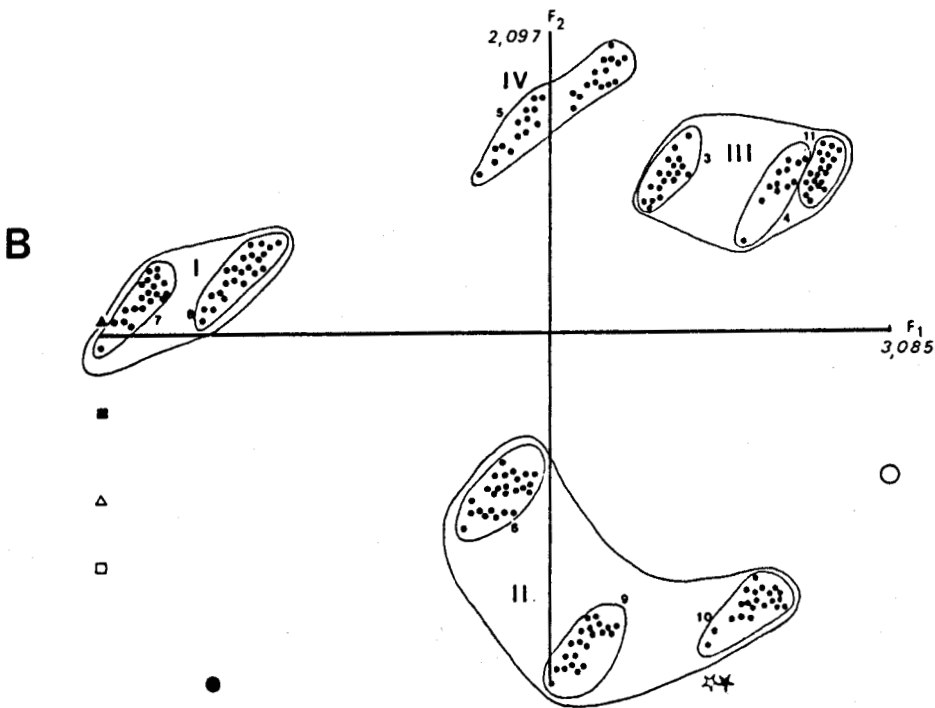
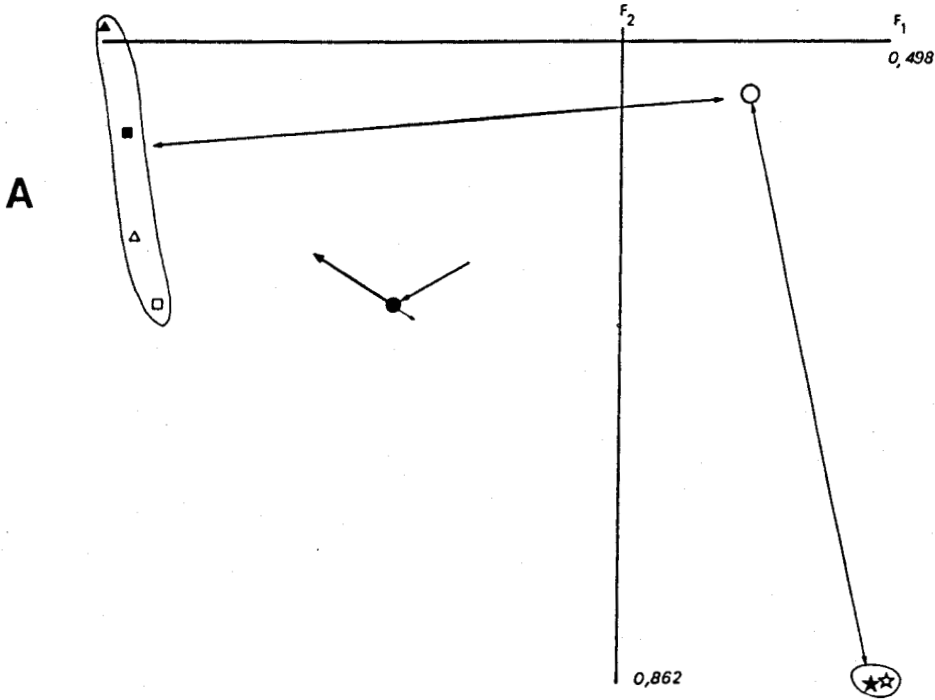
Il semblerait que la pluviométrie et la pression atmosphérique aient

LEGENDE \*



\*cette légende est celle des figures 66 à 75

Fig. 66 : A Représentation dans le plan  $F_1 - F_2$  des variables prises en compte dans l'A.M.  
B Position des échantillons dans le plan  $F_1 - F_2$





une action négative alors que les variations de température auraient un effet inverse. En figure 67, je donne une représentation du poids des facteurs  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  ( $F_3$  étant écarté dans le raisonnement car peu représentatif).

-  $F_1$  paraît caractérisé par deux pôles d'une part la température, d'autre part la pluviométrie et la pression atmosphérique. L'action de ces deux pôles influe sur la position de  $A_0$ .

-  $F_2$  est le facteur de la pluviométrie, l'ensemble des autres variables étant groupé proche du zéro.

A partir de ces éléments de raisonnement, il est clair qu'il semble impossible d'attribuer la responsabilité des variations des concentrations en Radon à une seule des données climatiques. L'effet négatif de la pluviométrie est confirmé et à retenir mais les tendances déjà évoquées pour les autres données demandent à être davantage étudiées.

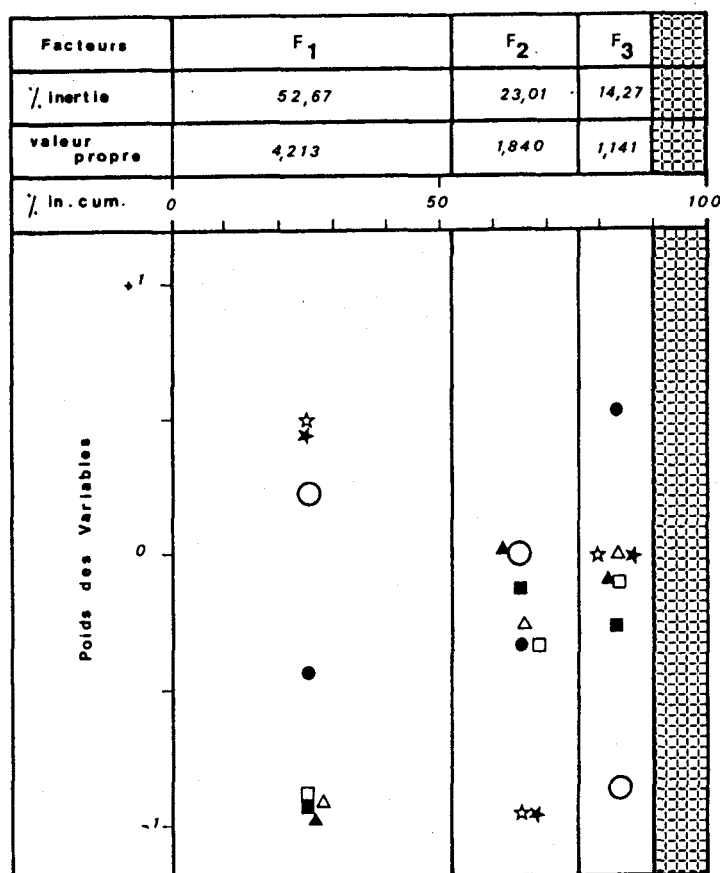


Fig. 67 : Poids des variables selon  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  dans l'A.M. des 190 échantillons d'eau analysés.

Le second volet de cette A.M. est l'étude de la position des individus (échantillons) dans l'espace  $F_1$ - $F_2$  ( fig. 66b). Ce qui est immédiatement remarquable, c'est la façon dont se groupent les échantillons : chaque petit nuage de points correspond à une série de prélèvements. Il est donc clair au vu de cette représentation que les facteurs météorologiques sont à prendre en considération pour l'étude des concentrations en Radon dans les eaux de source.

J'ai reconnu dans cette répartition les familles de groupe d'individus :

I : les échantillons de Juillet et Août 1984 (7 et 8, fig. 66b) : la période était relativement sèche, la température estivale.

Les concentrations en Radon relativement basses observées en juillet seraient attribuables au fait que la nappe superficielle était encore alimentée par les eaux printanières.

II. Les échantillons de Juin, Septembre et Octobre 1984 (6, 8, 10, fig. 66b) : ces mois ont été pluvieux, les températures relativement fraîches.

III. Les échantillons de Mars, Avril et Novembre 1984 (3, 4, 11, fig. 66b) : ces mois ont été pluvieux, les températures assez fraîches.

IV. Les échantillons de mai 1984 (5, fig. 66b) : ce mois a été sec, les températures normales.

La position des nuages de points est commandée par les facteurs météorologiques dont les variations semblent participer aux variations des concentrations en Radon.

Il serait intéressant de prolonger ce travail en diminuant l'espacement des mesures (toutes les semaines, voir tous les jours sous certaines conditions) et en reconduisant ce type d'étude sur 12 mois de plus afin de voir si ce groupement de point en famille se confirme et peut mieux s'interpréter.

#### b) A.M. du comportement de quelques sources

Pour ne pas alourdir la présentation des résultats, j'ai choisi délibérément de ne présenter, sous forme graphique, que quelques unes des analyses multivariées dont il va maintenant être discuté.

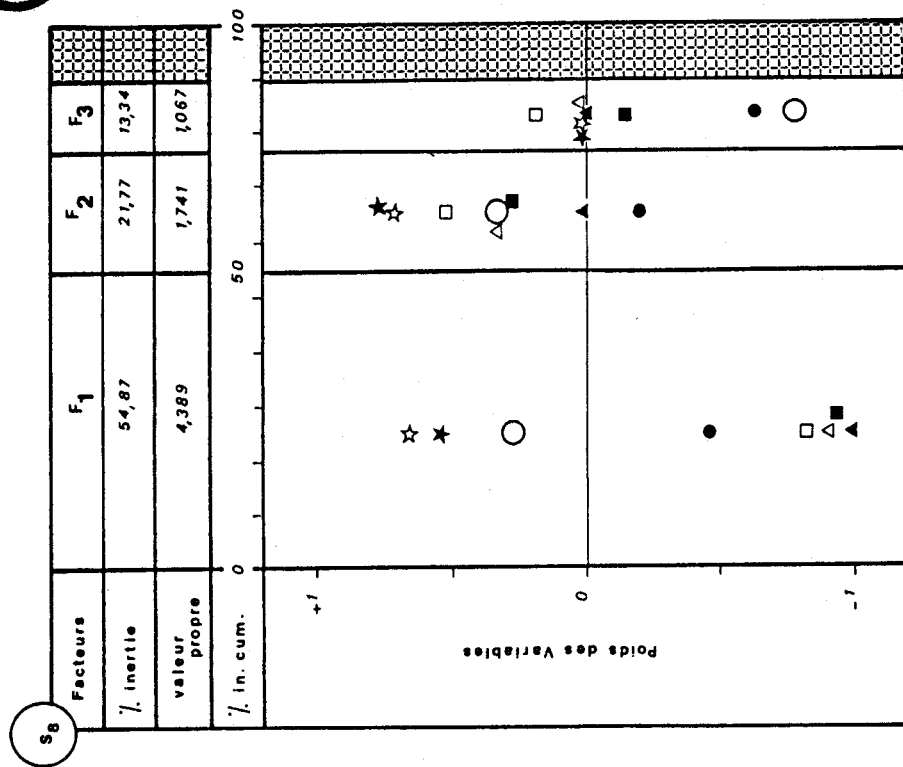


Fig. 69 : Oizy, S.8 : poids des facteurs

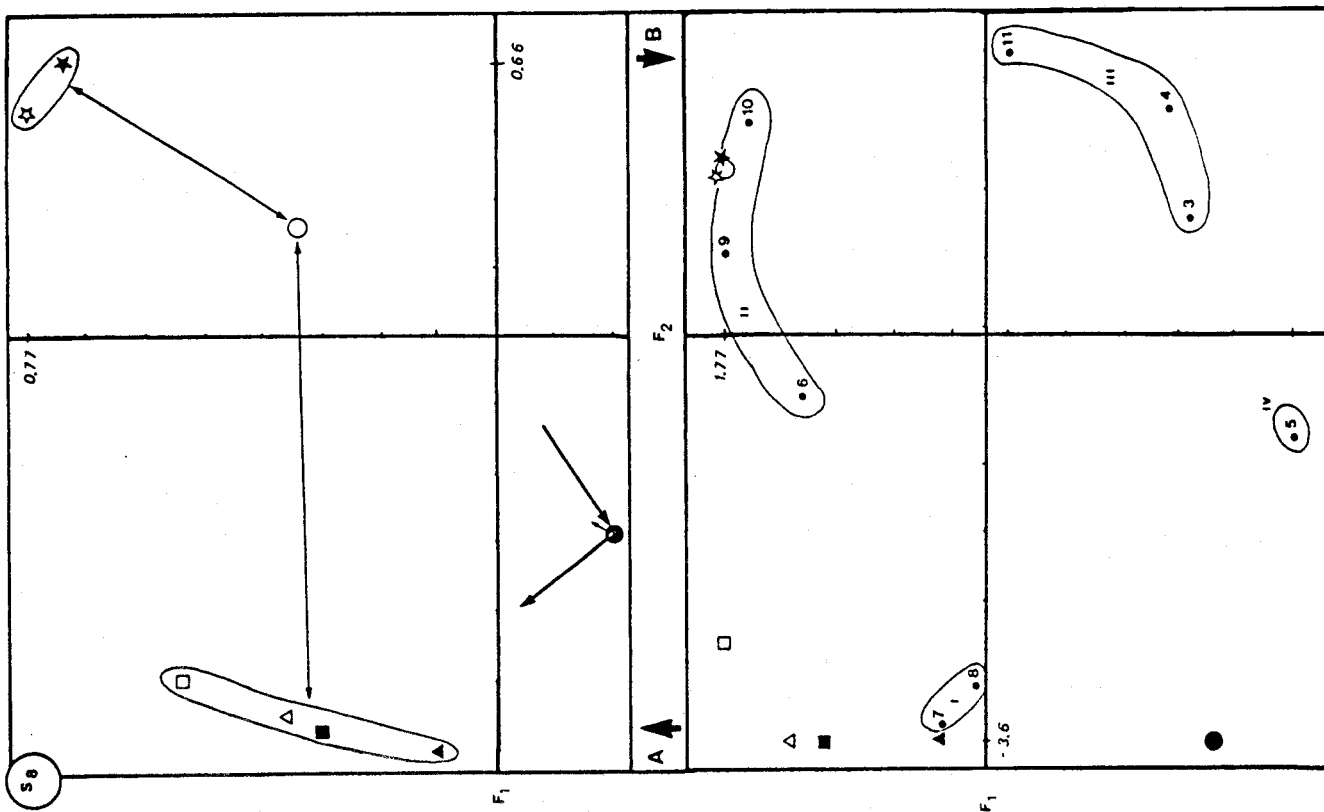


Fig. 68 : Oizy, S.8 : A. position des variables dans le plan F<sub>1</sub> - F<sub>2</sub>.

B. position des individus dans le plan F<sub>1</sub> - F<sub>2</sub>.

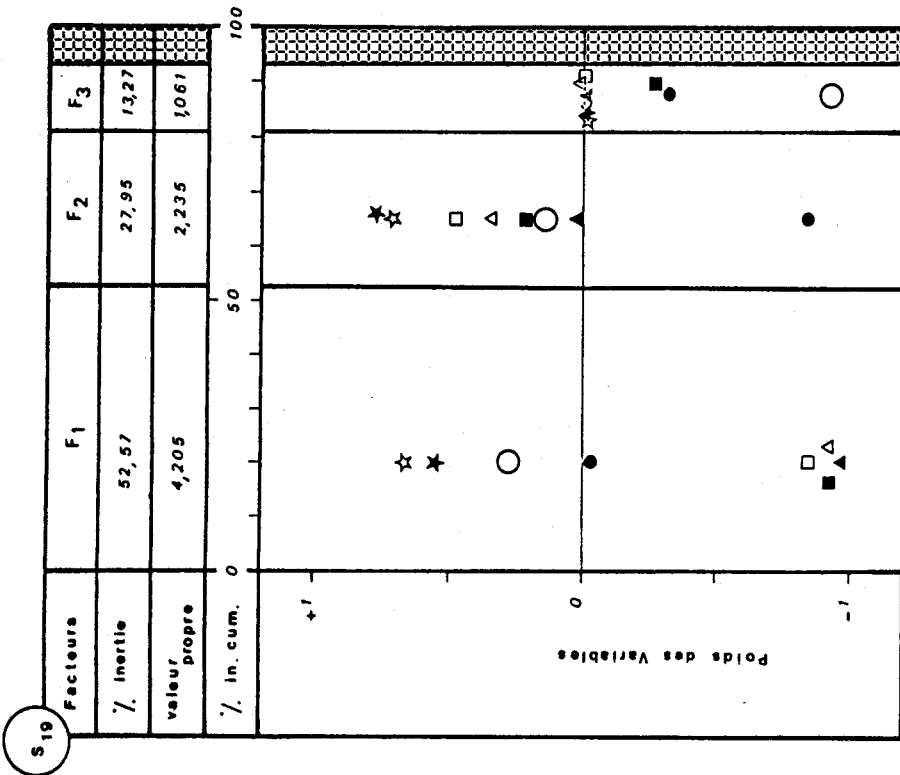
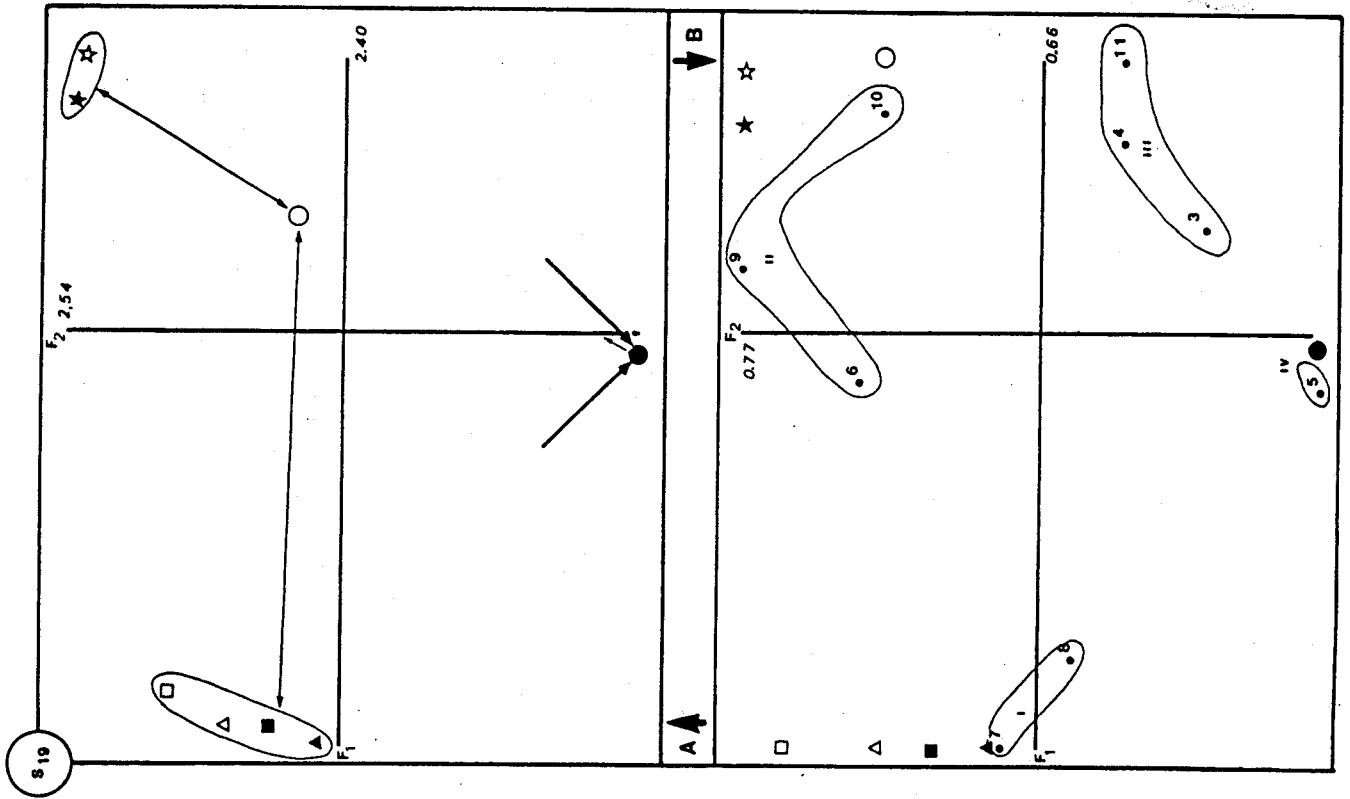


Fig. 70 : Monceau, S.19 : poids des facteurs

Fig. 71 : Monceau, S.19 A. position des variables dans le plan  $F_1 - F_2$ .

B. position des individus dans le plan  $F_1 - F_2$ .

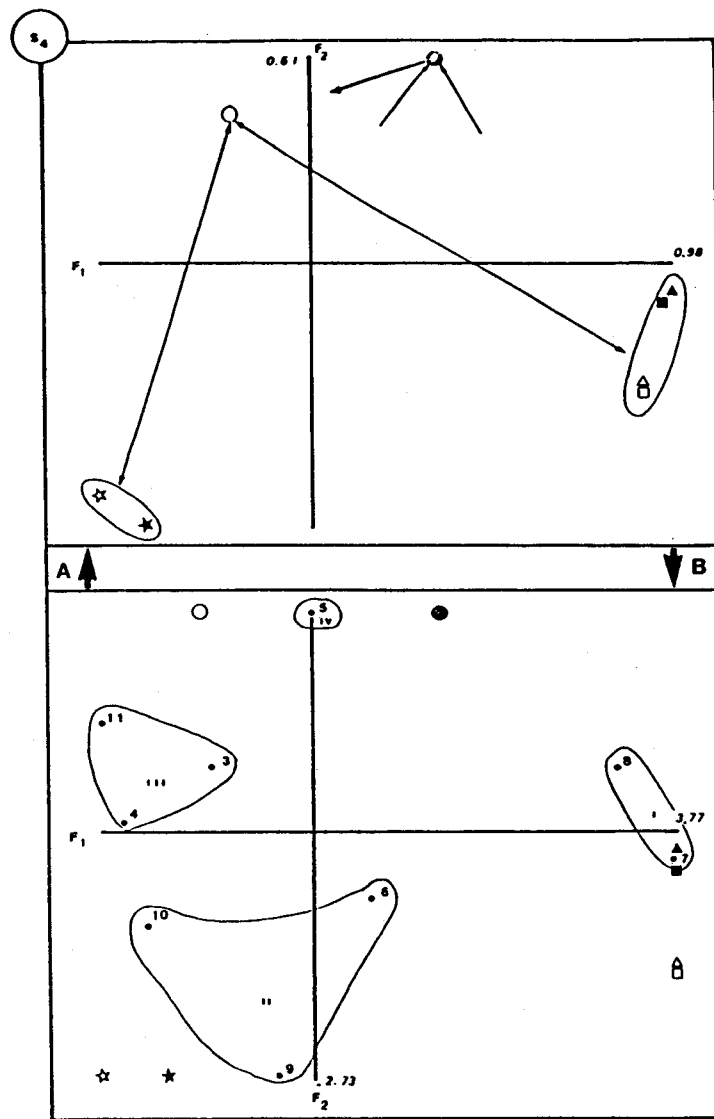


Fig. 73 : Six Planes, S.4 A. position des variables dans le plan  $F_1$ - $F_2$ .  
 B. position des individus dans le plan  $F_1$ - $F_2$ .

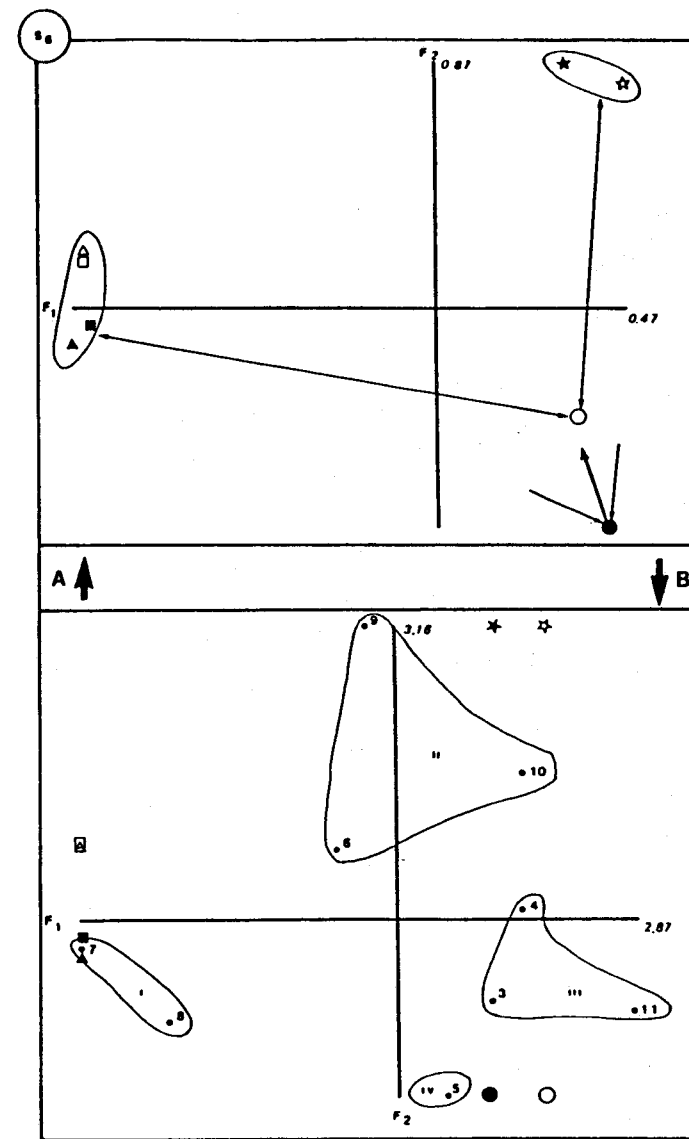


Fig. 72 : Le Rouvelet-les Maisonnettes, S.6 A. position des variables dans le plan  $F_1$  -  $F_2$ .  
 B. position des individus dans le plan  $F_1$  -  $F_2$ .



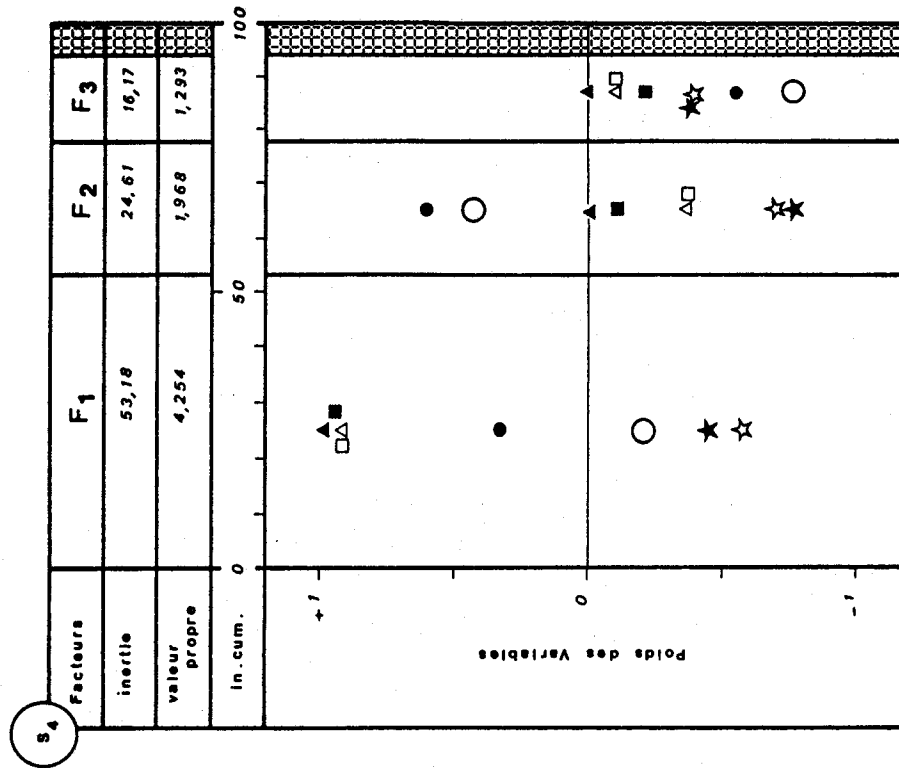


Fig. 75 : Six Planes, S.4 : poids des facteurs

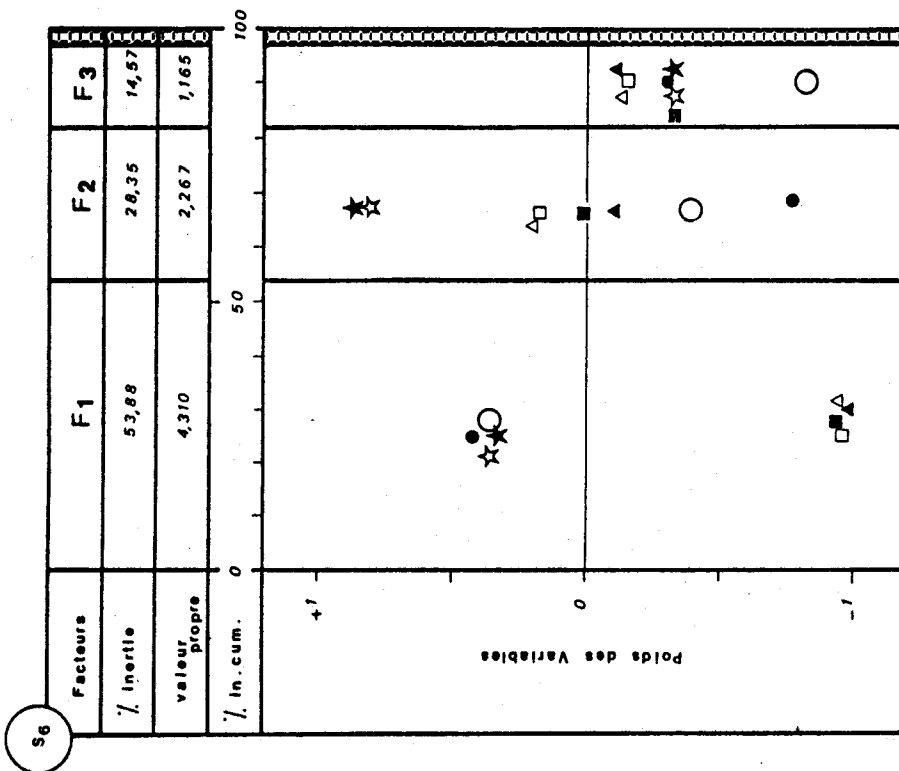


Fig. 74 : Le Rouvelet - les Maissonnettes, S.6  
poids des facteurs



Dans le secteur d'Oizy, j'ai choisi  $S_8$ , à Monceau  $S_{19}$ , au Rouvelet - Les Maisonnettes  $S_6$  et à Six Planes  $S_4$ . Les résultats sont présentés sur les figures 68 à 75 selon le même principe que précédemment.

D'une façon générale, les résultats de l'A.M. sont dans la ligne de l'étude des 190 individus. Les poids et la signification des facteurs (fig. 69, 70, 74, 75), la répartition des 4 familles (fig. 68, 71, 72, 73) sont apparemment des constantes de cette étude. Les différences enregistrées sont de prime abord à mettre au compte de la "morphologie" de la source. Mais ce fait aussi reste à confirmer en approfondissant l'étude. Je citerai cependant quelques exemples. Le cas de  $S_8$  et  $S_6$  en est un.  $S_8$  est une petite source, à fleur de terre et donc fort sensible à la pluviométrie alors que  $S_6$  est mieux protégée des actions météoriques directes par sa situation en sous bois et à flanc de talus et par son débit. Ceci peut amener des éléments de réponse quant à la signification des différences de qualité des relations de  $A_0$  avec les variables climatiques (fig. 68 et 72). Le même type d'argumentation pourrait être développée pour  $S_{19}$  et  $S_{20}$ ,  $S_8$  et  $S_{10}$ .

Les influences météorologiques sur le comportement des sources de Monceau ( $S_1$ ,  $S_{19}$ ,  $S_{20}$ ,  $S_{32}$ ) apparaissent être du même ordre et définir ainsi une famille de sources. Les sources  $S_4$  et  $S_6$  semblent avoir des points de comportement communs, ceci indépendamment de leur situation géographique.

Il semblerait donc que cette étude en A.M. permette de dégager des similitudes de comportement mais il ne faut pas perdre de vue le peu d'individus pris en compte et donc la nécessité d'étendre ce type d'étude à un plus grand nombre de mesures.

### 3.3.5. CONCLUSION

Le bilan de cette étude des relations entre la concentration en Radon des eaux de sources et le climat semble positif. La certitude de l'action négative de la pluviométrie est acquise, des tendances semblent se dégager quant à l'action des autres éléments pris en compte. L'analyse multivariante a permis de définir des familles d'échantillons directement tributaires des variations saisonnières ainsi que des types "morphologiques" de sources. Cependant, tous ces acquis demandent des confirmations dont l'obtention dépassent le cadre de la prospection que j'ai réalisée. Les voies d'étude que j'ai signalées dans ce paragraphe restent à exploiter.



### 3.4. ANALYSE QUANTITATIVE DE QUELQUES SOURCES

#### 3.4.1. INTRODUCTION

Rapidement dans le déroulement de la prospection hydrochimique, je me suis heurté à un problème : celui de la signification des mesures faites. La technique employée donne un résultat qualitatif. De plus, le seuil de détection n'était pas déterminé de façon précise. J'ai donc cherché à contacter un organisme susceptible de réaliser des analyses quantitatives. En France, on connaît les activités du S.C.P.R.I. dirigées par le Prof. PELLERIN notamment au niveau des analyses des sources hydrothermales (1962). En Belgique, il existe plusieurs organismes susceptibles de réaliser ce type d'analyses d'eaux. J'ai pris contact avec le Ministère de la Santé Publique dont un service réalise actuellement un inventaire des sources hydrominérales belges.

J'ai effectué avec ce service deux sorties sur le terrain, ainsi 8 sources ont été analysées à la fois par les services de M. GILLARD et au Laboratoire de la F.P.Ms.

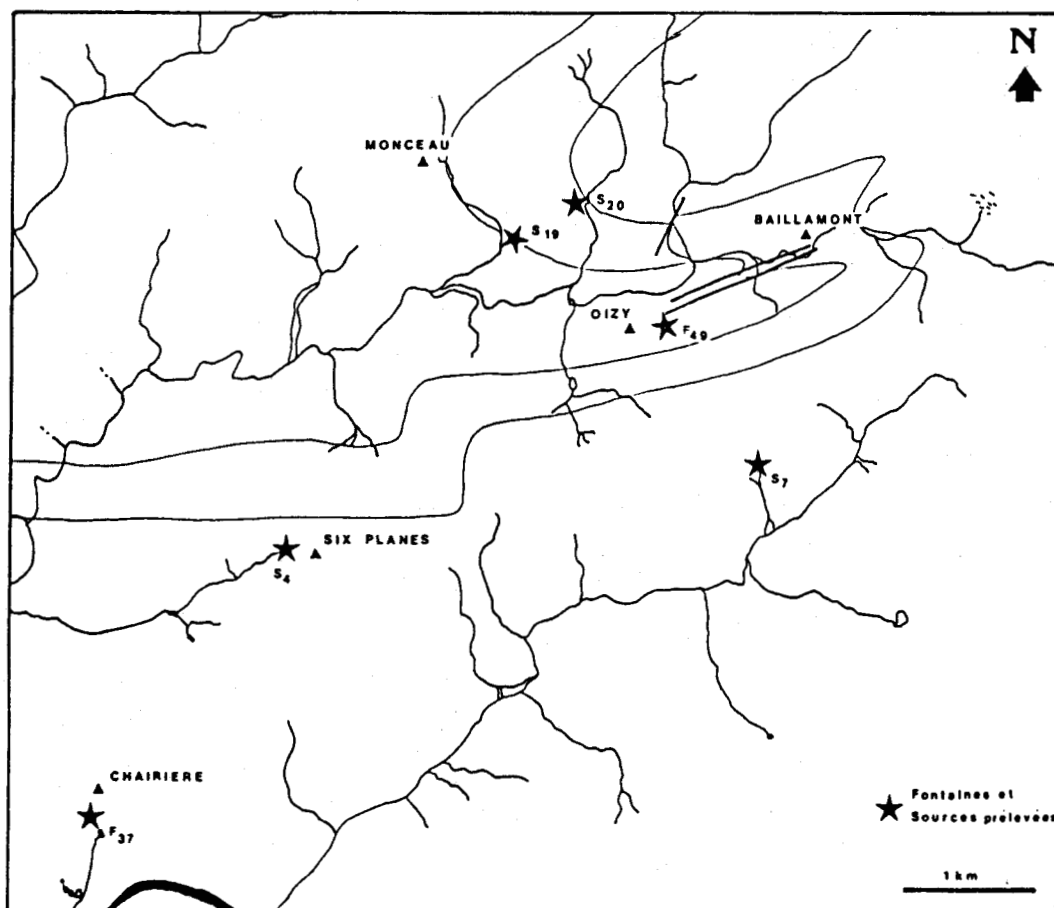


Fig. 76 : Situation des sources et fontaines analysées par le Ministère de la Santé Publique.

### 3.4.2. LES RESULTATS

En figure 76 je présente la carte de situation des sources analysées. Je les ai choisies en fonction des données qualitatives : une ou deux sources par anomalie, et une fontaine dont les taux de comptage permettent de considérer qu'elle est représentative du bruit de fond régional.

#### 3.4.2.1. PRESENTATION DES RESULTATS DU MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE (voir les fiches de résultats en Annexes VIII)

De ces résultats, j'ai exploité trois séries :

- le dosage du Radon par estimation des produits de filiation (Rn1)
- le dosage du Radon par émanation (Rn2),
- le dosage du Radium.

Je les compare avec mes résultats obtenus lors de l'extraction par le toluène (fig. 77 et 78 ).

Pour le Radon, la figure 77 indique clairement que les variations enregistrées sur les sources analysées par trois techniques différentes vont dans le même sens.

D'un point de vue quantitatif, l'Institut d'Hygiène considère comme attribuables au bruit de fond les doses suivantes :

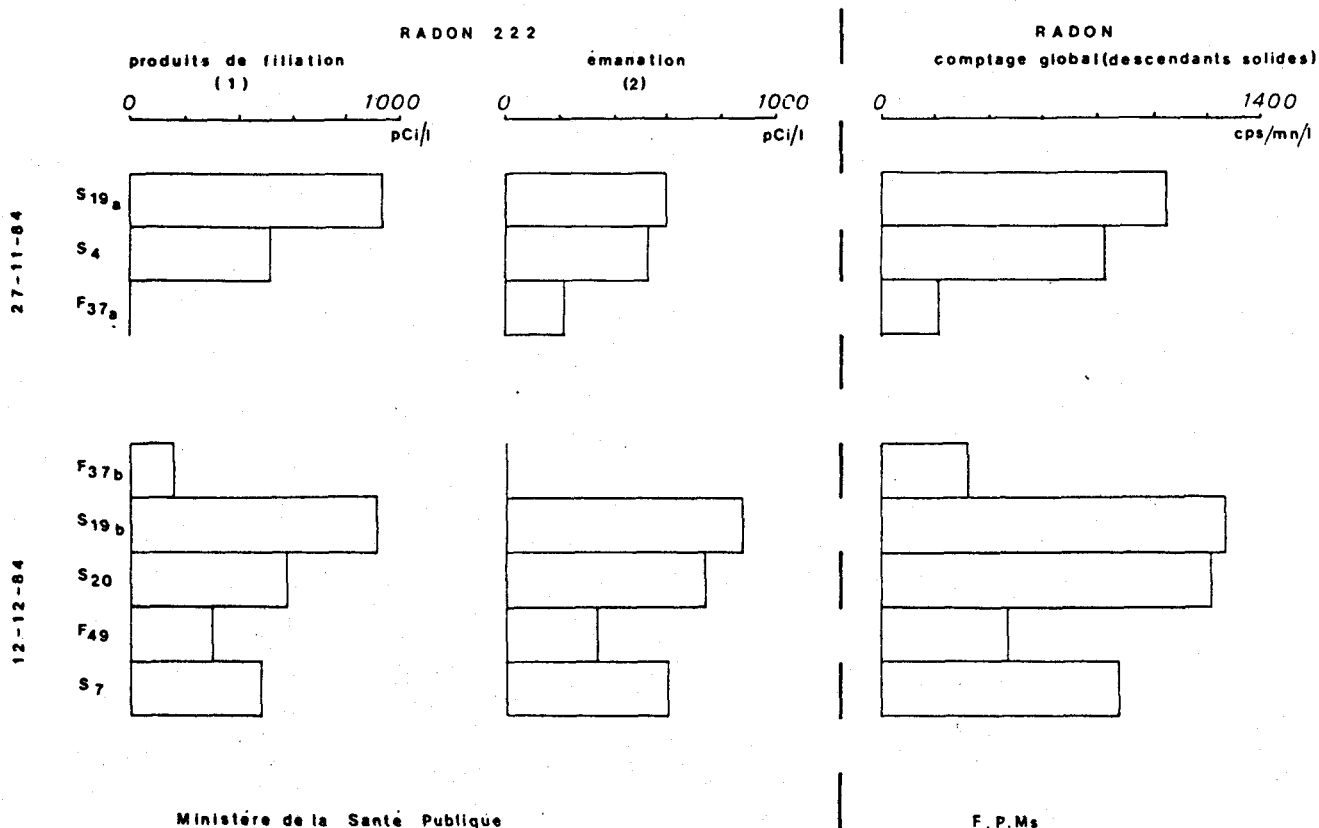


Fig. 77 : Comparaison des résultats des 3 types de dosage du Radon 222

- . 3 pCi/l de Radium 226
- .500 pCi/l de Radon 222

J. DENIS-LEMPEREUR (1984) donne comme dose de tolérance pour l'eau de source :

- . 400 pCi/l de Radium 226
- .4000 pCi/l de Radon 222

De ces chiffres, je conclus que les échantillons dosés ne contiennent qu'une quantité négligeable de Radium, que les 8 dosages de Radon sont au-dessus du bruit de fond et que 6 d'entre eux présentent des concentrations en Radon supérieures à la dose de tolérance (fig. 78).

	N°	Rn <sub>1</sub>	Rn <sub>2</sub>	Ra	Rn
27 11 84	S <sub>19a</sub>	9380	6020	1.29	1049
	S <sub>4</sub>	5176	5350	0.32	832
	F <sub>37a</sub>	—	2100	0.04	213
12 12 84	F <sub>37b</sub>	1620	—	0.02	322
	S <sub>19b</sub>	9166	8747	0.16	1269
	S <sub>20</sub>	5750	7386	0.13	1215
	F <sub>49</sub>	2910	3302	0.22	466
	S <sub>7</sub>	4800	5995	0.27	875

pCi/l

cps/mq/l

Fig. 78 : Principaux résultats des analyses du ministère de la Santé Publique. Comparaison avec les résultats de la F.P.Ms .

### 3.4.2.2. Comparaison entre les données de la F.P.Ms et celles du Ministère de la Santé

Le but de cette série d'analyses était triple :

- obtenir une confirmation de la réalité des anomalies mises en évidence par la méthode appliquée en prospection hydrochimique,
- déterminer si les phénomènes décelés étaient attribuables au seul Radon dissous dans l'eau ou à la présence de Radium,
- tenter d'étalonner la chaîne de spectrométrie gamma de la F.P. Ms utilisée, à l'aide des résultats quantitatifs.

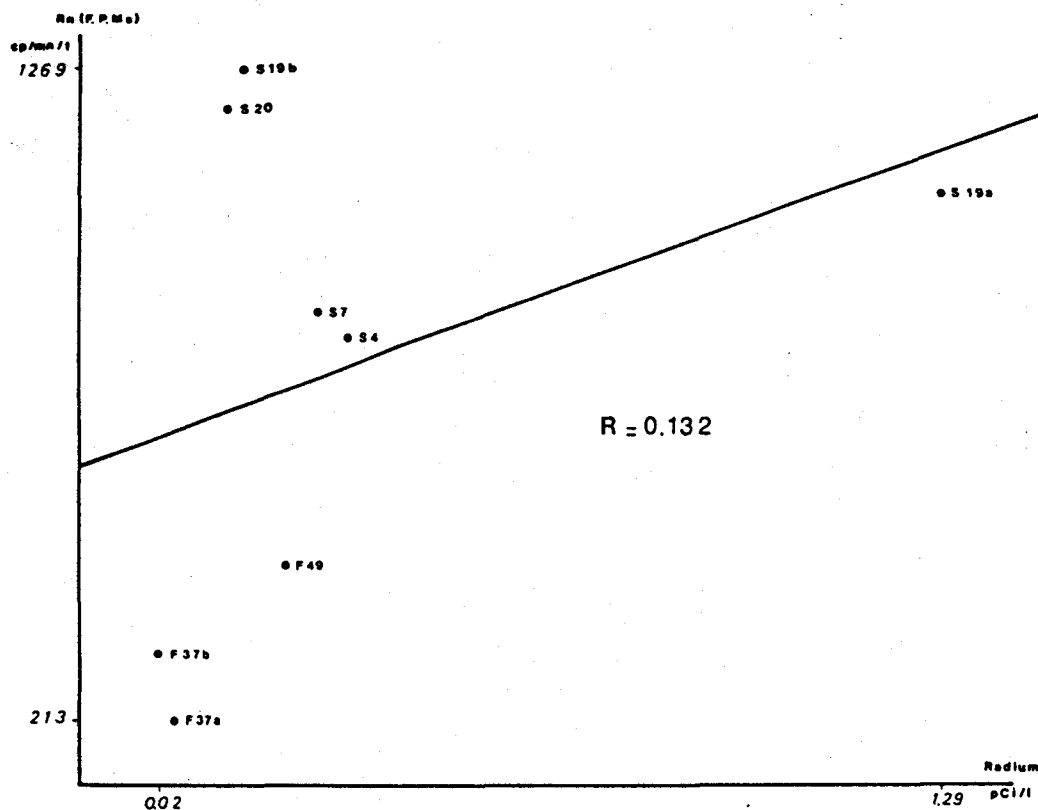


Fig. 79 : Relation  $Rn_{(F.P.Ms)} = f(\text{Radium})$

Je crois pouvoir affirmer que les objectifs sont atteints :

- les sources que je considère anormales en Radon et qui ont été analysées présentent toutes de concentrations supérieures à 4000 pCi/l;
- les dosages du Radium, la relation de la fig. 79 indiquent clairement que le Radium décelé n'est pas le responsable des concentrations en Radon mises en évidence par l'extraction au Toluène;
- les figures 80 et 81 montrent que le Radon dosé est bien le responsable de l'activité de l'eau mise en évidence par le biais de l'extraction par le toluène. La différence existant entre les deux corrélations est liée aux méthodes de dosage employées. La première ( $R_n 1$ ) est basée sur l'estimation des produits de filiation (fig. 80). La seconde est un dosage par émanation. Cette dernière méthode semble donner les meilleurs résultats (fig. 81). ( $R = 0,958$ ).

L'excellent coefficient de corrélation existant entre mes mesures et celles du dosage par émanation permet d'envisager une conversion des résultats qualitatifs obtenus en pCi/l. Ceci à partir de l'équation de

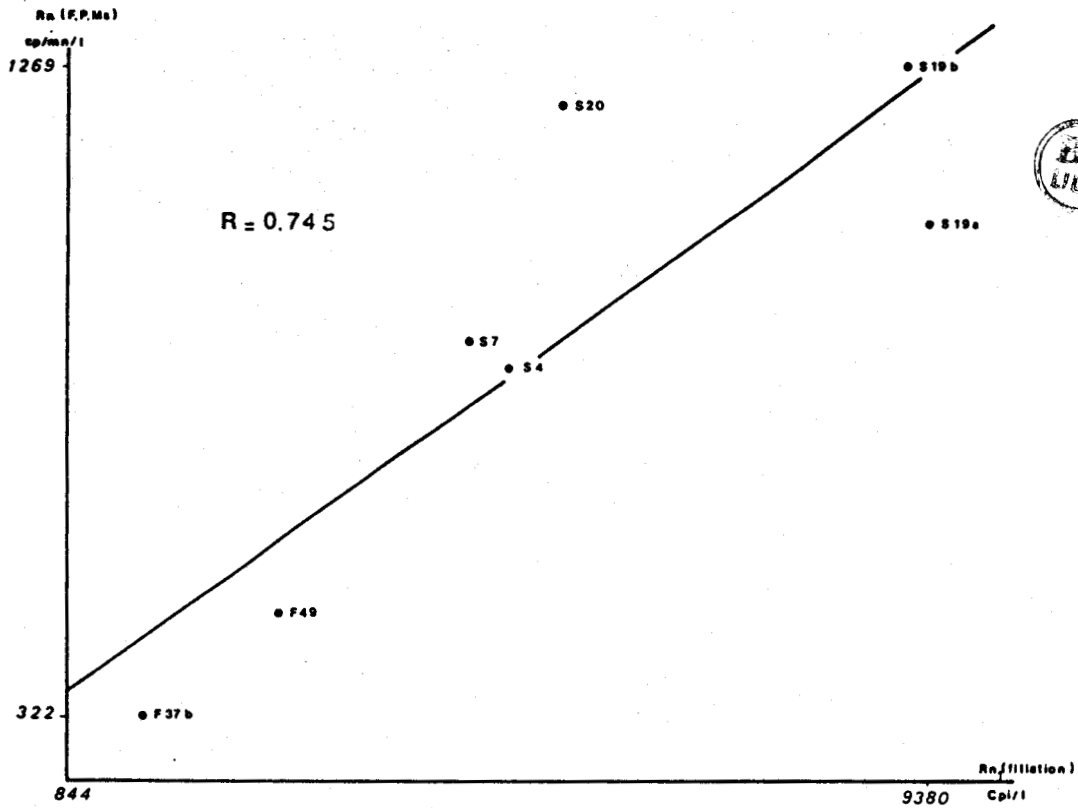


Fig. 80 : Relation  $R_n$ (F.P.Ms) = f( $R_n$ ) .Comparaison entre l'activité du toluène et le dosage par estimation des produits de filiation

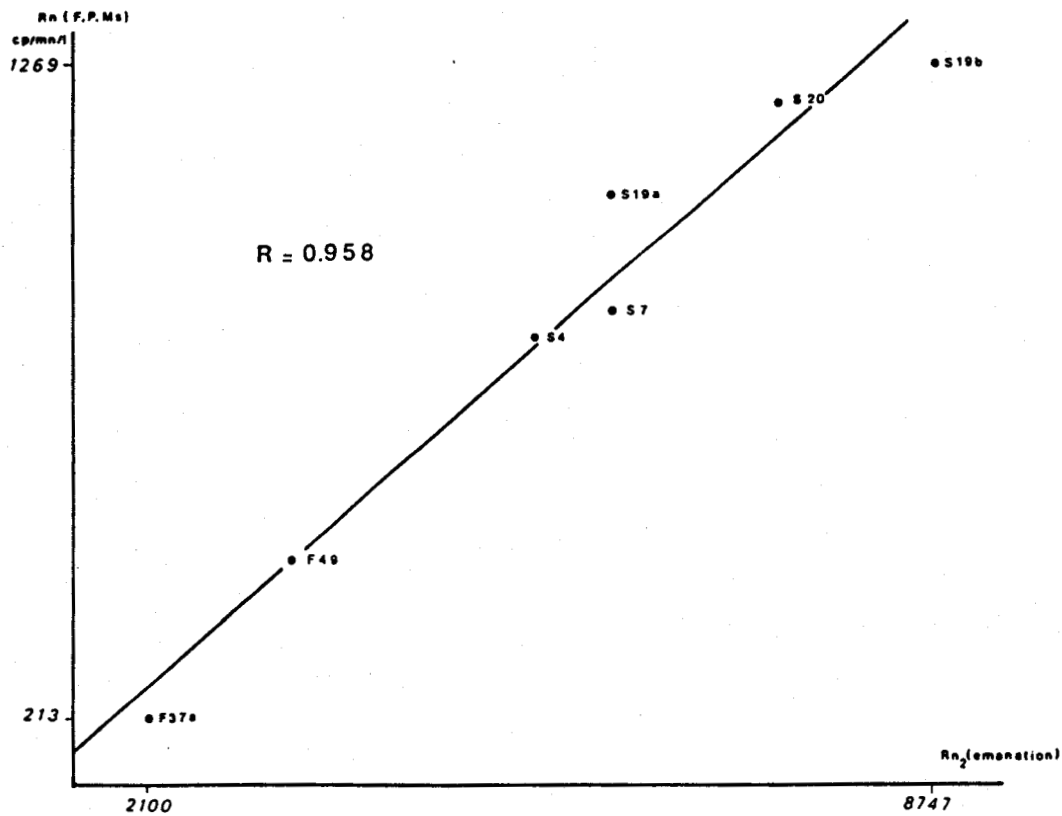


Fig. 81 : Relation  $R_n$ (F.P.Ms) = f( $R_n$ ). Comparaison entre l'activité du toluène et le dosage par émanation.

la droite de corrélation de la fig. 81. On applique alors :

$$y = ax + b \quad \text{donc } x = \frac{y - b}{a}$$

avec :  $x = \text{dose en pCi/l}$

$y = \text{Activité en cp/mm/l (coups par minute et par litre)}$

$a = 0,167$

$b = 82,649$

Il est alors possible d'établir un tableau de conversion du modèle de celui de la figure 82.

Y	X
100	1094
500	3489
1000	6483
1500	9477

$$Y = aX + b \quad \text{avec } a = 0.167 \\ b = -82.649$$

Fig. 82 : Conversion des Activités (Y en cp/mm/l) en doses (X en pCi/l).

### 3.5. LE RADIUM DANS LES EAUX ANALYSEES

#### 3.5.1. INTRODUCTION

Le Radon détecté dans les eaux peut avoir deux origines :

- . du Radon dissout sous forme gazeuse et transporté sans isotope-parent (Radon "libre");
- . du Radon généré par du Radium présent, dissout dans le liquide. C'est alors du Radon "lié". Dans ce cas, la quantité de Radon lié reste constante car généré en permanence par le Radium. La durée devie de ce dernier (1660 ans), permet de le considérer comme stable à l'échelle du temps de mesure (QUINIF, DOREMUS, CHARLET, BOUKO, 1984).

Systématiquement, lors de la prospection, les échantillons ont subi deux extractions :

- la première servait à déterminer l'activité de la source,

- la seconde visait à détecter la présence de Radium dans les eaux de source.

Grâce aux analyses quantitatives, il a été possible de comparer les teneurs en Radium et mes propres dosages.

### 3.5.2. DETERMINATION DE LA PRESENCE DE RADON "LIBRE"

Je reprends en figure 83 les exemples présentés dans un article paru en 1984 sur la méthode de prospection que j'ai appliquée. Dans ce tableau, S<sub>1</sub> et R<sub>29</sub> présentent à la seconde extraction des concentrations en Radon non négligeables (64 à 80 cp/mm/l) alors que S<sub>4</sub> montre l'exemple typique de l'échantillon à Radon "libre".

Il est possible que les concentrations en Radium présentes en S<sub>1</sub> et R<sub>29</sub> soient supérieures à celle relevée en S<sub>4</sub> (0,32 pCi/l). La différence d'activité à la première extraction entre R<sub>29</sub> et S<sub>1</sub> est due au fait que R<sub>29</sub> est un ruisseau dont les eaux sont brassées, aérées, alors que S<sub>1</sub> est une source dont les eaux n'ont que peu ou pas de contacts avec l'air avant le point de surgence.

	Activité à la 1 <sup>re</sup> extraction	Activité à la 2 <sup>e</sup> extraction
S <sub>1</sub>	339 cps/mm	80
S <sub>4</sub>	237	7,2
R <sub>29</sub>	18	64

Fig. 83 : Radon libre et Radon lié. Résultats de 2 extractions sur 3 exemples. (in Quinié & al. 1984)

Ces 3 exemples sont représentatifs de l'ensemble de l'étude au cours de laquelle peu de régénérations de Radon ont été mises en évidence. Par ailleurs, la part d'activité des sources attribuables au Radium n'est apparemment pas importante, le Radon "libre" étant prépondérant.

### 3.5.3. RADON ET RADIUM, UTILISATION DES DONNEES DU MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE

J'ai montré en 3.4.2.2. que les concentrations en Radium relevées sont négligeables. Ceci confirme mes propres constatations.



J'ai repris la relation  $R_n$  (F.P.Ms.) =  $f$  ( $R_a$ ) déjà présentée en 3.4.2.2. (fig. 79). L'échantillon  $S_{19a}$  ( $R_a = 1,29$  pCi/l) comparé au  $S_{19b}$  ( $R_a = 0,16$  pCi/l) semblant douteux, j'ai établi la même relation pour les 7 autres analyses. Le résultat est en figure 84, la disparition de  $S_{19a}$  paraît l'améliorer un peu mais le coefficient de corrélation reste mauvais ( $R = 0,180$ ). Ceci confirme la caractère "libre" du Radon, l'activité de l'eau n'est donc attribuable qu'en faible part au Radium présent.

Afin de savoir s'il est possible d'attribuer l'activité mesurée en seconde extraction (après 1 mois ou plus de stockage en bouteille close) au Radium dosé quantitativement, j'ai mis en relation les teneurs en Radium avec l'activité mesurée en 2ème extraction pour quelques sources. Il semblerait d'après la figure 85 que le Radium est fortement responsable de l'activité Radon mesurée ( $R = 0,811$ ). Il convient cependant d'être prudent car le nombre de mesures disponibles est insuffisant pour être significatif.

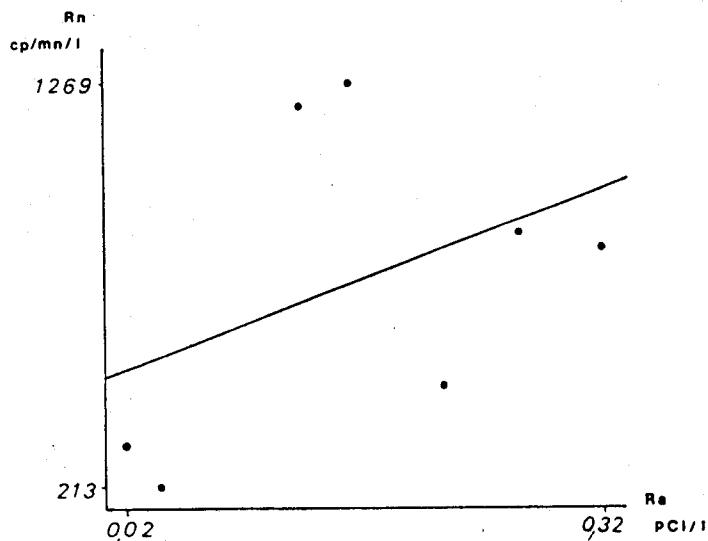


Fig. 84 : Relation  $R_n$ (F.P.Ms) =  $f$ ( $R_a$ ) ( $R = 0.180$ ). La relation est ici établie après la première extraction.

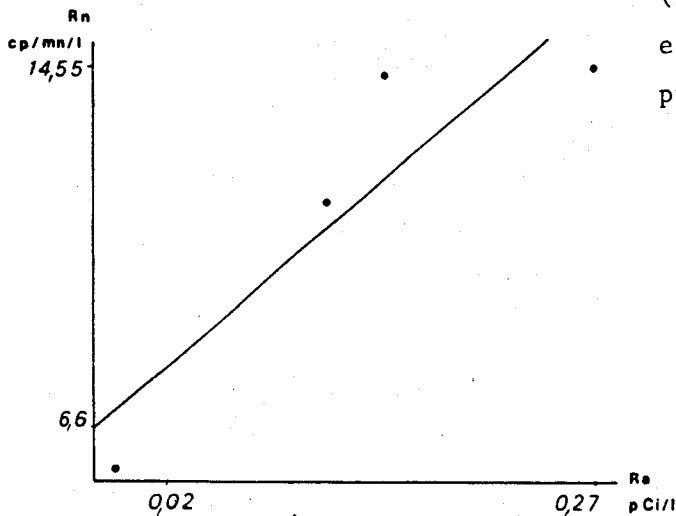


Fig. 85 : 2<sup>ème</sup> extraction, relation  $R_n$ (F.P.Ms) =  $f$ ( $R_a$ ). ( $R = 0.810$ )

### 3.5.4. CONCLUSIONS

Il apparaît qu'il existe deux types de sources (ou point d'échantillonnage) dans l'ensemble que j'ai analysé :

- le premier : type  $S_4$  ne porte que du Radon "libre";
- le second : type  $S_1-R_{29}$  porte du Radon "libre" et une faible part de Radon "lié" dû à la présence de faibles quantités de Radium dissout.

Le Radium mis en évidence tant par mes analyses que par les quelques dosages (8) du Ministère de la Santé Publique n'est pas le principal générateur du Radon présent dans les eaux de sources. Ce Radon est donc probablement dissout à l'état gazeux au niveau de zones d'émission de ce gaz baignées par les nappes aquifères. On peut pour l'origine penser par exemple, à des formations géologiques porteuses d'anomalies uranifères sur roches à des zones fracturées du "type Oizy".

Par ailleurs, il serait intéressant de développer les études sur le Radium et la façon de le déceler par la méthode utilisée . Ceci pour tenter de quantifier la part que le Radium a dans l'activité initiale des eaux analysées.

### 3.6. ASPECTS HYDROGEOLOGIQUES

#### 3.6.1. GENERALITES

Les résultats obtenus en prospection hydrochimique pourraient s'appuyer sur, et étayer une étude hydrogéologique (LEVEQUE *et al.*, 1972). Les anomalies Radon (fig. II et III hors-texte) cartographiées sont décelées par l'analyse des eaux de source. L'hydrogéologie par l'étude de la circulation aquifère permettrait de préciser l'origine des anomalies.

Dans la région concernée (Oizy, Six Planes-Monceau ), il n'existe pas de travaux de synthèse ni même ponctuels en hydrogéologie. J'ai pris contact pour m'en assurer avec le Service Géologique de Belgique (M. DERUYCK). De cette rencontre, il ressort les faits classiques suivants :

- dans le Gédinnien, la circulation des eaux est avant tout liée à la fracturation,
- les couches gréseuses se comportent comme des roches réservoirs,
- les débits observés sont variables (de 1 à 10) et généralement plus élevés dans les roches schisteuses que dans les grès.

De ces quelques éléments, je ne retiendrai que deux choses : l'importance de la fracturation et le rôle de réservoir des grès.

### 3.6.2. POSSIBILITES D'ETUDES FUTURES

Il est clair que ce qui précède est insuffisant pour étayer les relations entre l'hydrogéologie et l'origine du Radon des sources étudiées. Aborder une telle discussion constitue une étude complète en soit. Il serait bon, maintenant que l'hydrochimie a situé les anomalies, de poursuivre les investigations par d'autres moyens en réalisant une étude hydrogéologique de l'aquifère des sources anormales, notamment par sondages et profils électriques et en envisageant enfin l'implantation d'un sondage au droit des points intéressants (i.e. l'origine des eaux riches en Radon).

### 3.7. CONCLUSION - PERSPECTIVES D'ETUDE

J'ai tenté de montrer que la méthodologie utilisée est fiable et qu'elle peut être plus qu'un outil de prospecteur. Il peut servir de mode de surveillance de variation d'émanation du Radon. En effet, si la prise en compte des données climatiques ainsi que des données morphologiques des sources s'affine, il devient alors possible, en choisissant une fréquence de prélèvement appropriée de surveiller les variations, au sens strict, de l'émanation. Pour en arriver là, je pense qu'il faudrait poursuivre les travaux de laboratoire. Pour les phénomènes liés à l'étalonnage quantitatif et au dosage du Radium, il faudrait maintenir le type de collaboration que nous avons établi avec le Ministère de la Santé Publique afin de confirmer régulièrement la validité de l'étalonnage établi (paragraphe 3-4).

Quoiqu'il en soit, des voies de travail que j'ai signalées au cours de ce chapitre, au niveau de cette étude, le bilan est positif: la méthode de prospection est fiable, pratique à utiliser dans sa forme actuelle.

Les anomalies en Radon mises en évidence, ont été confirmées par les analyses quantitatives. Le fait qu'elles soient liées à du Radon libre semble établi.



**3<sup>ème</sup> PARTIE**







# CHAPITRE I

PRESENTATION TECTONOSTRATIGRAPHIQUE DES ANOMALIES







## CHAPITRE I

### PRESENTATION TECTONOSTRATIGRAPHIQUE DES ANOMALIES

#### I.1. L'ANOMALIE DE LA CARRIERE D'OIZY

##### I.1.1. LITHOSTRATIGRAPHIE

La carrière d'Oizy (fig. 86) a été ouverte dans les grès et quartzophyllades de Braux. Actuellement, l'excavation offre à l'observateur, dans sa partie Ouest, une coupe dans ces faciès.

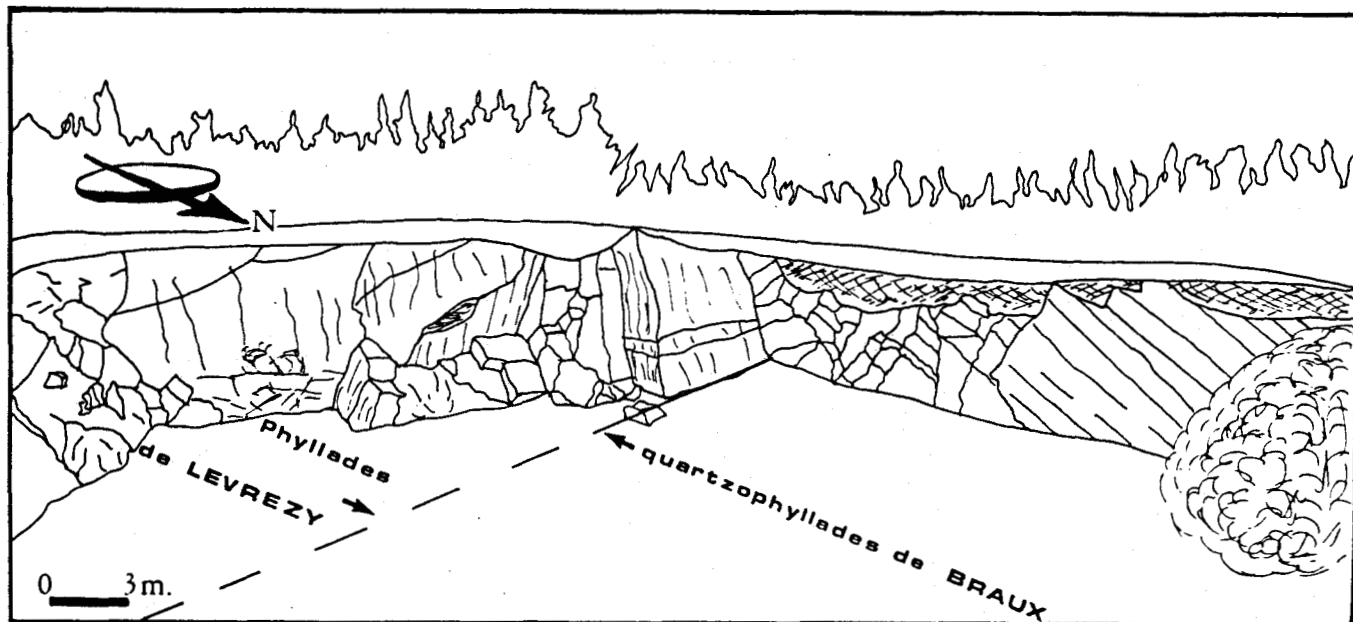


Fig. 86 : Carrière d'Oizy - Vue d'ensemble

Le fond de carrière ainsi que l'Est du front de taille montre à l'affleurement les faciès supérieurs des phyllades de Levrezy plus difficiles à observer du fait de l'existence d'une zone broyée due au passage de failles (voir en 1.1.2) en cet endroit.

A l'affleurement, on observe trois types de faciès (fig. 87) :

- des grès à ciment pélitique de teinte jaune clair à vert riches en laminations de matière organique et caractérisés par de très belles stratifications entrecroisées (fig. 88);

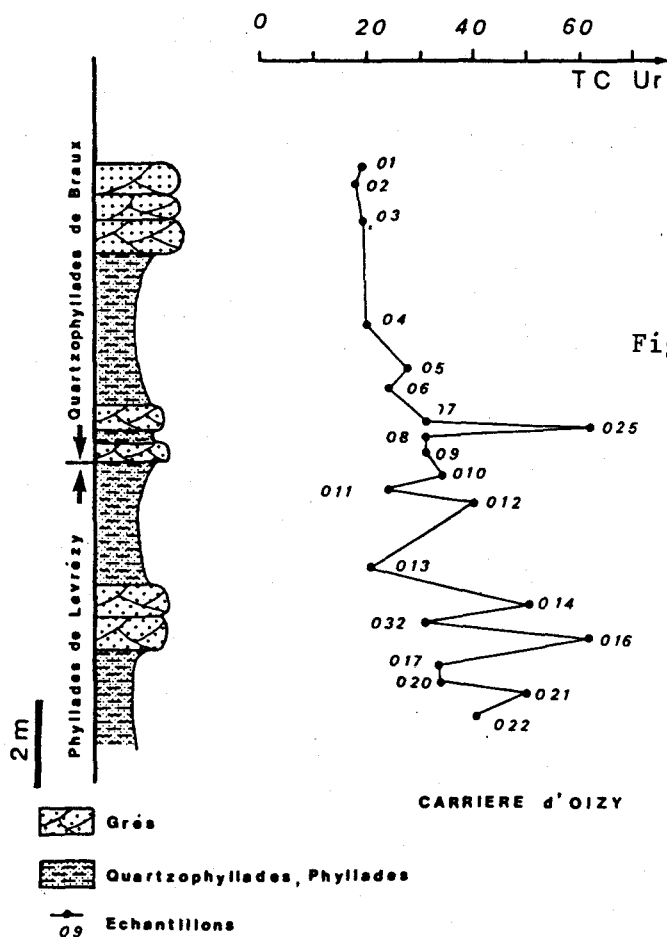


Fig. 87 Colonne lithostratigraphique synthétique, activité de terrain.

- des quartzophyllades à schistosité grossière montrant une alternance de lits pélitiques et gréseux millimétriques . La dominance gréseuse est nette (fig. 89). Ces roches sont, elles aussi, relativement riches en matière organique;
- les phyllades sont en fait un faciès proche du précédent. La différence essentielle réside dans le fait que la tendance pélitique l'emporte sur la tendance gréseuse.

D'un point de vue minéralogique (voir 3<sup>e</sup> partie, Chap. IV), la composition de ces faciès est assez comparable, seules les proportions des phases changent. Le quartz détritique et les argiles (Illites, Chlorites) dominant. En lame mince, on observe en plus de la matière organique, des oxydes de fer (hématites, goethite, quelques magnétites), quelques feldspaths (albités) de rares cristaux de pyrite, de la tourmaline, des zircons... C'est-à-dire une minéralogie assez classique pour les terrains du Paléozoïque inférieur de l'Ardenne (E. ASSELBERGHS, 1946; A. BEUGNIES, 1984).

En figure 87, j'ai présenté une colonne lithostratigraphique synthétique de la carrière, en fait la tectonique rend la lecture plus difficile surtout pour les couches les plus basses de la série.

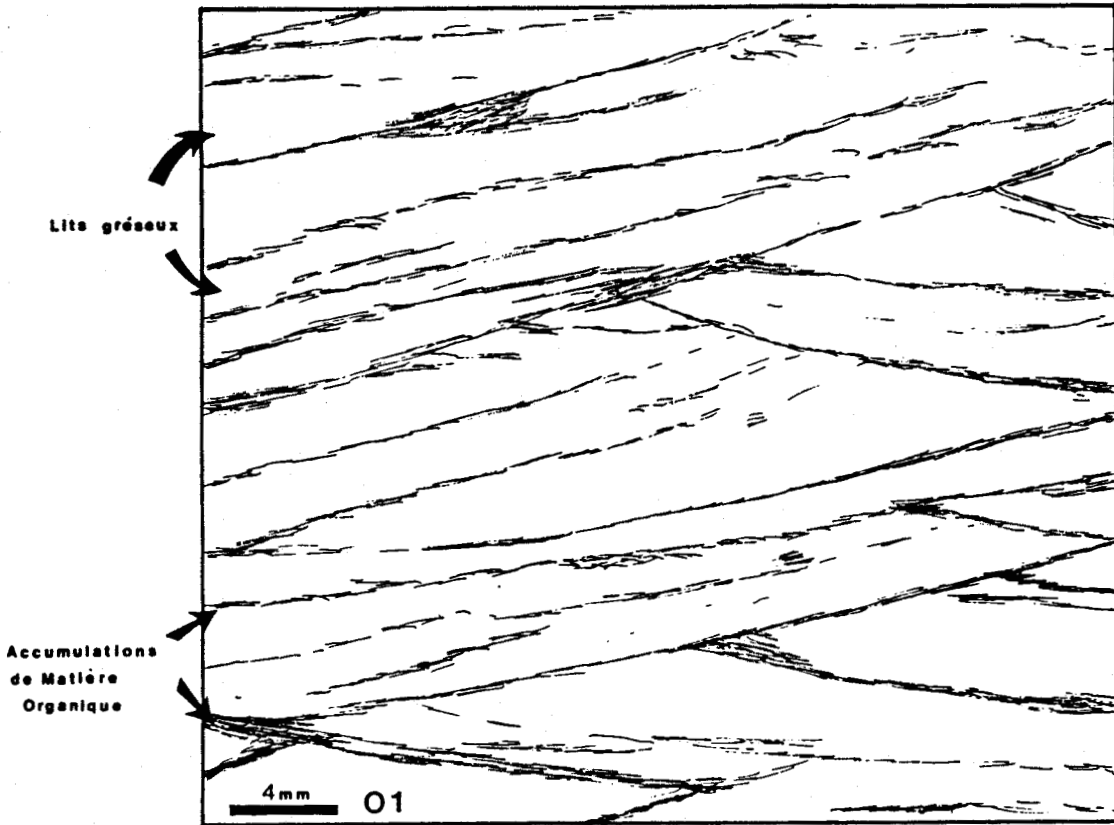


Fig. 88 : Grès à stratifications entrecroisées

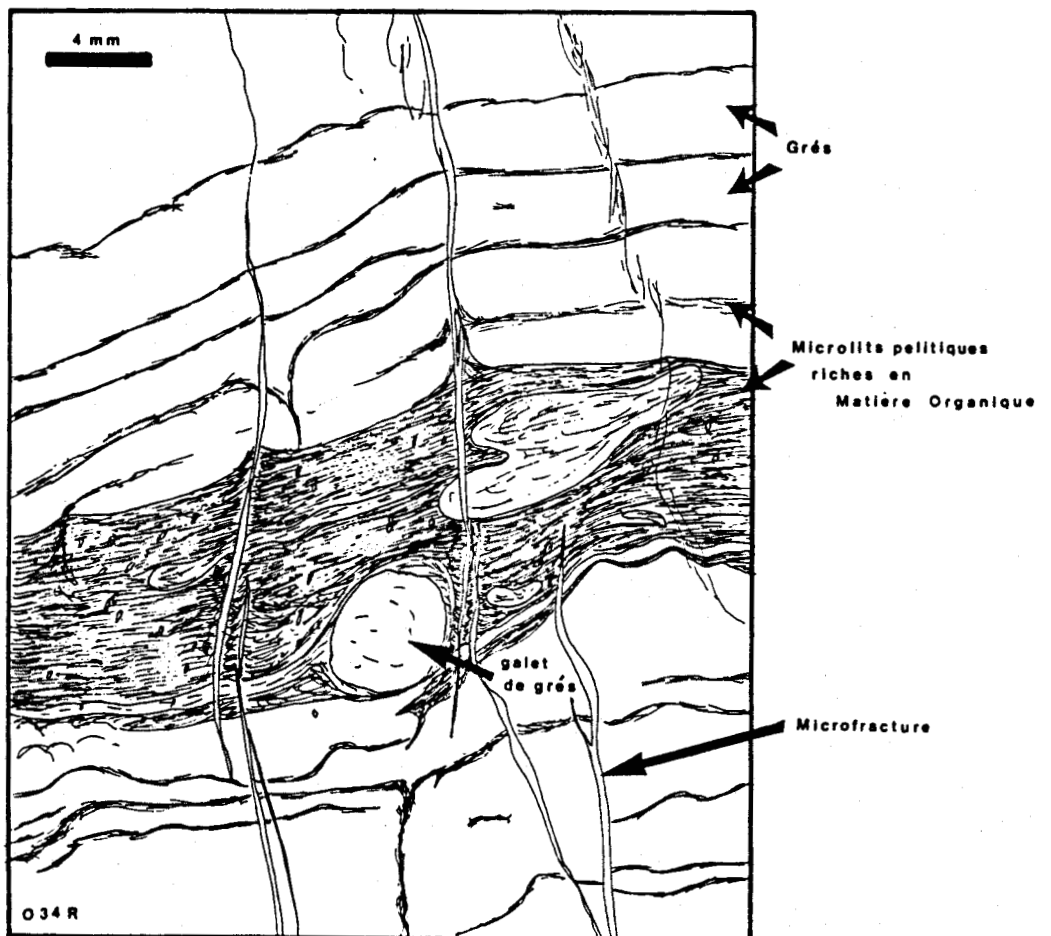


Fig. 89 : Quartzophyllade

### I.1.2. STRUCTURE DE LA CARRIERE D'OIZY

J'ai déjà décrit, en 2ème Partie, Chap. II, le passage de failles dans la zone de la carrière et cité l'importance qu'elles ont dans la présente étude. La première chose qui attire l'attention en pénétrant dans la carrière (fig. 86), c'est la présence de 2 miroirs de failles subparallèles au niveau du front de taille.

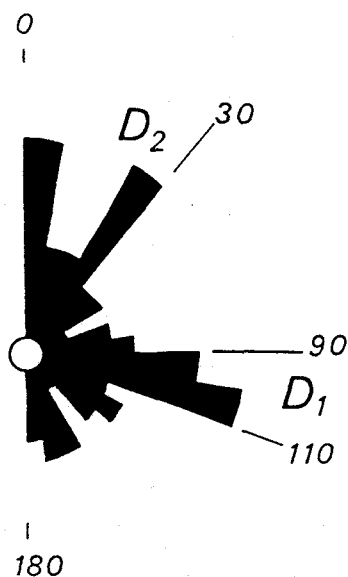
Une observation plus approfondie révèle l'existence d'un troisième miroir de faille ( $F_3$ ) entre les deux autres ( $F_1$  et  $F_2$ ) (fig. 90 A et B). En fait, le fond de carrière est une zone très tectonisée où les failles et fracturés ont largement perturbé la stratigraphie.

Le jeu de ces failles en distension est accompagné du développement d'un réseau de fracture très dense. Les mesures faites systématiquement dans la carrière mettent en évidence 2 familles principales de fractures ( $D_1$  et  $D_2$ ) qui correspondent à celles dont l'existence fut signalée, pour tout le Nord de la France, par J.P. COLBEAUX (1977) (fig. 90 et 91). Certaines de ces fractures sont ouvertes et remplies d'un sédiment limonitique.

La famille  $D_1$ , d'orientation N 90-110°, (fig. 91) présente des caractéristiques d'orientation et de pendage qui semblent permettre de la rattacher à la faille  $F_3$  (fig. 90 A). Cette dernière recoupe et décale le plan de faille  $F_1$ .

La famille  $D_2$ , d'orientation N 10-30°, est sécante au système de failles et fractures déjà présenté et auquel elle est postérieur. Les fractures  $D_2$  sont le plus souvent fermées et vides.

Fig. 91 : Mise en évidence des directions de fracturation  $D_1$  &  $D_2$  dans la carrière d'OIZY (Rosace établies sur 100 mesures).



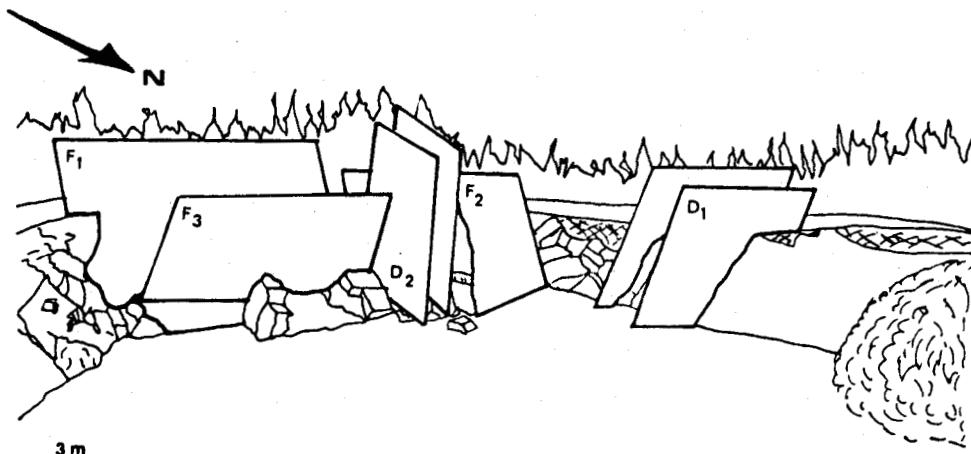
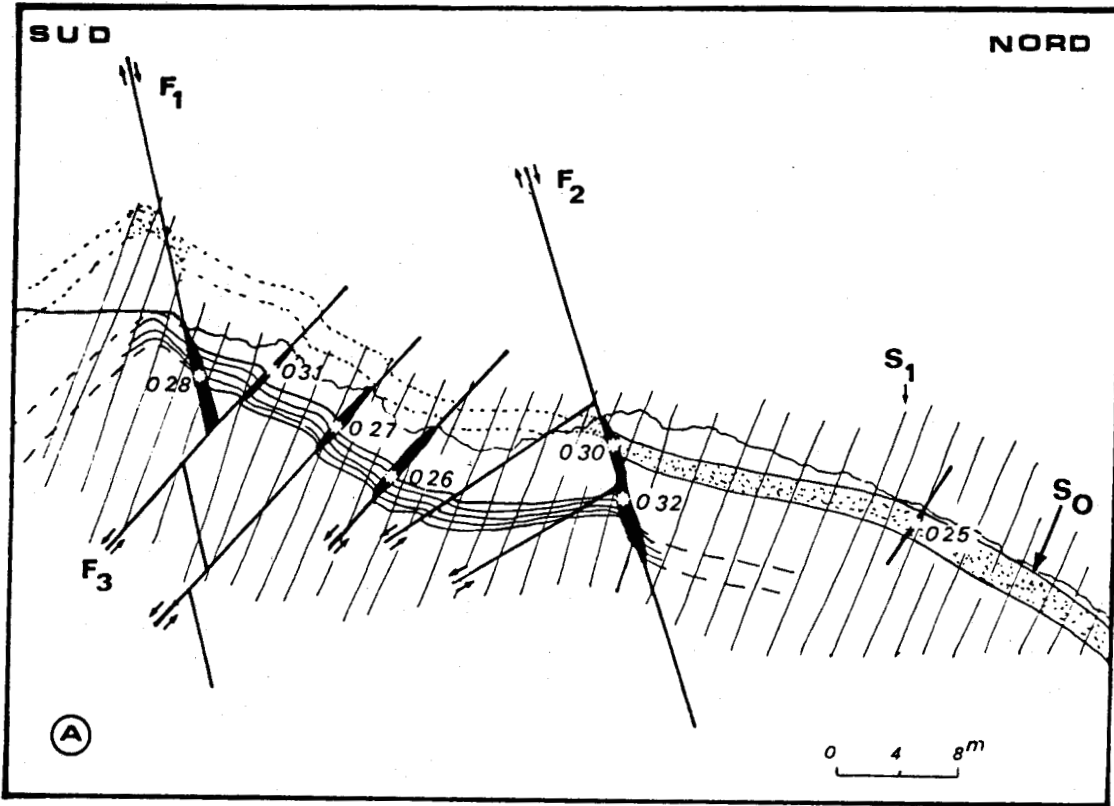







Fig. 90 : Structure de la carrière d'OIZY : A coupe synthétique

B schéma panoramique.

-  Quartzophyllades de Braux
-  Phyllades de Levrézy
-  Failles
-  Failles à contenu radioactif
-  Localisation des échantillons

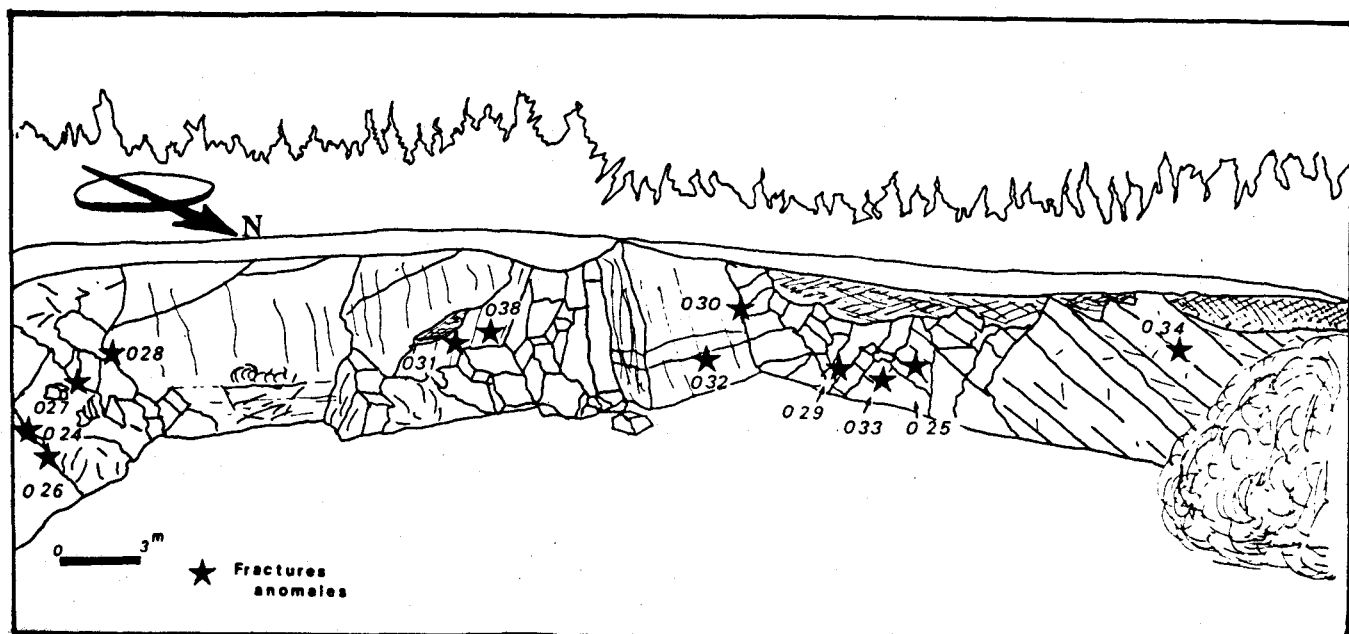
Cet ensemble de fractures et de failles en distension s'est développé dans des couches gréseuses qui au niveau de la carrière forment un repli anticlinal. Ceci explique le pendage Nord des couches observées dans la partie Ouest de la carrière (fig. 86 et 90 A). Ce repli est dû à la digitation de l'anticlinal d'Oizy (1ère partie, Chap. III, § 3.2.2.2.) On peut supposer que les différences de compétence entre les phyllades de Levrézy et les grès et quartzophyllades de Braux ont favorisé la genèse des accidents observables en cet endroit.

### 1.1.3. LOCALISATION DE L'ANOMALIE

Le fait établi par l'étude préliminaire était l'existence d'une anomalie radiométrique dans la carrière.

Le but du levé scintillométrique a été de situer le siège de cette anomalie. J'ai présenté en figure 86 la relation stratigraphie-radioactivité de terrain (exprimée en Ur : voir annexe II). La lecture de cette figure montre que la courbe de radioactivité est fortement hachée.

En 1.1.2, l'existence de fractures à remplissage limonitique a été évoquée (fig. 90 A). Lorsque les mesures de radioactivité se font sur le terrain, les fractures pleines de ce sédiment sont nettement plus actives que les roches qui les entourent (planche photo II). Une première approche, rapide, laisse croire que les roches sont porteuses de l'anomalie. L'étude plus précise, tenant compte des effets liés à la géométrie des affleurements, permet d'affirmer que les anomalies radiométriques relevées sont liées aux fractures minéralisées.



Partant de cette certitude, j'ai relevé dans la carrière la présence d'un certain nombre de ces fractures (fig. 90 A et 92 ).

Elles ont été étudiées : leurs relations avec la stratification (So), les familles  $D_1$  et  $D_2$  ont été observées. La construction de rosaces à partir des mesures de terrain conduit au résultat suivant : toutes ces mesures montrent l'appartenance des fractures anormales à la famille  $D_1$  (fig. 93 et planche photo III).

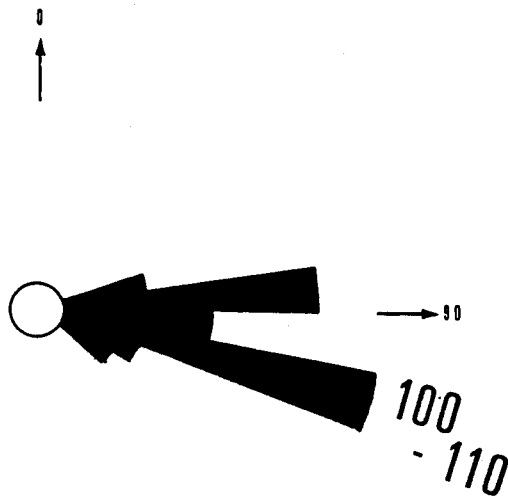


Fig. 93 : Fractures anormales  
rosace construite sur 30 mesures

Le faible nombre de fractures anormales fait que celui des mesures est limité mais malgré tout, il ne semble pas que cette orientation unique soit un hasard. Ce fait doit avoir une implication génétique.

◀ Figure 92 : Carrière d' Oizy  
Situation de 12 fractures dont le remplissage est anomal.



PLANCHE PHOTO II



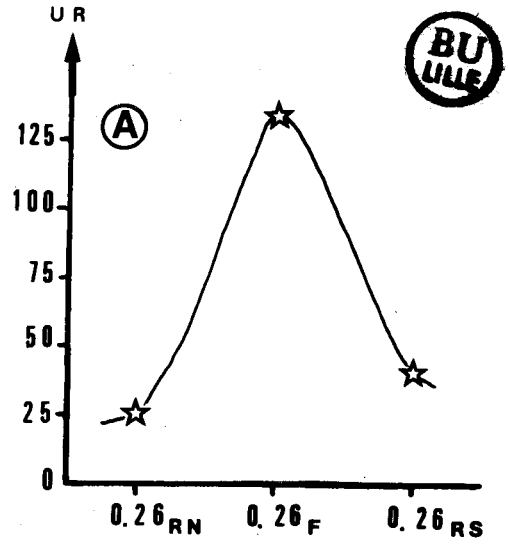
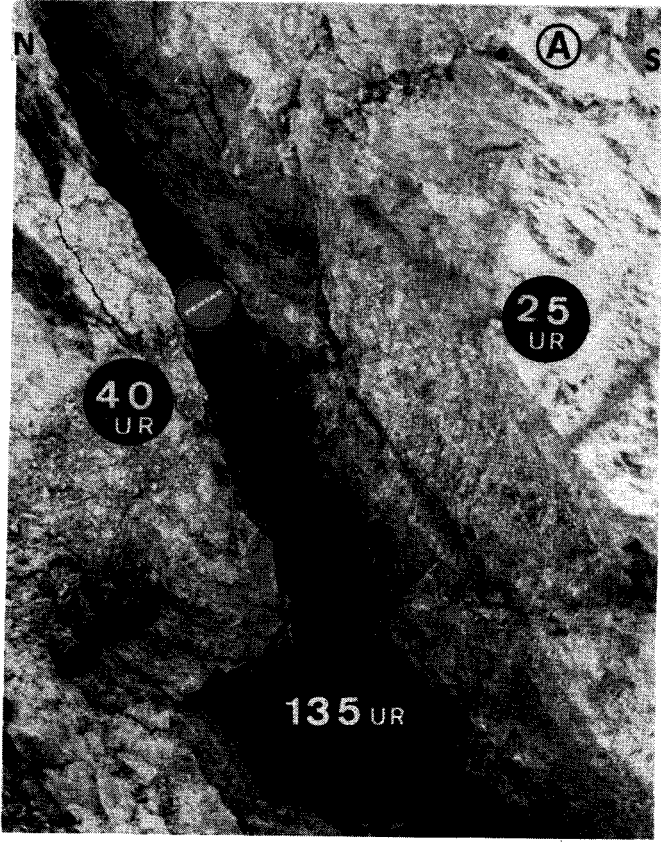
Localisation des anomalies au sein des fractures.

Relations avec les roches incombantes.

A) Cas de 026

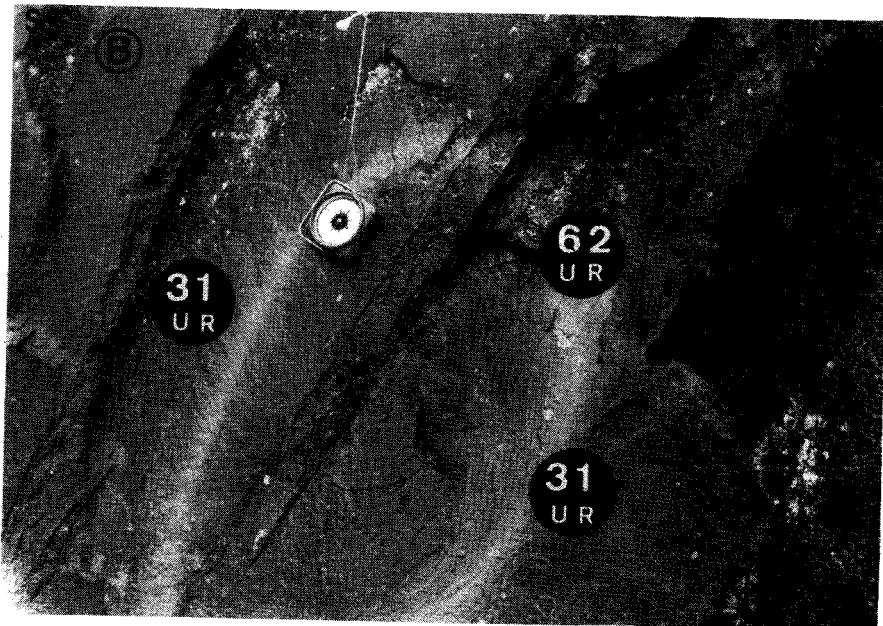
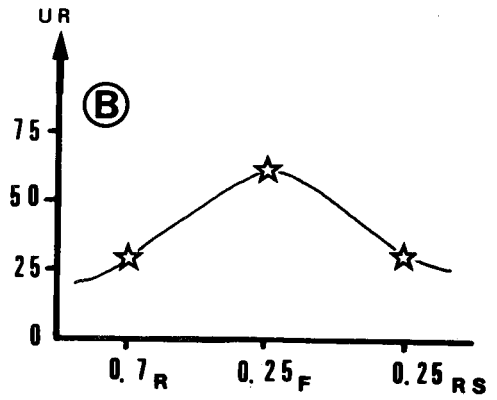
B) Cas de 025

PLANCHE II



NORD

SUD



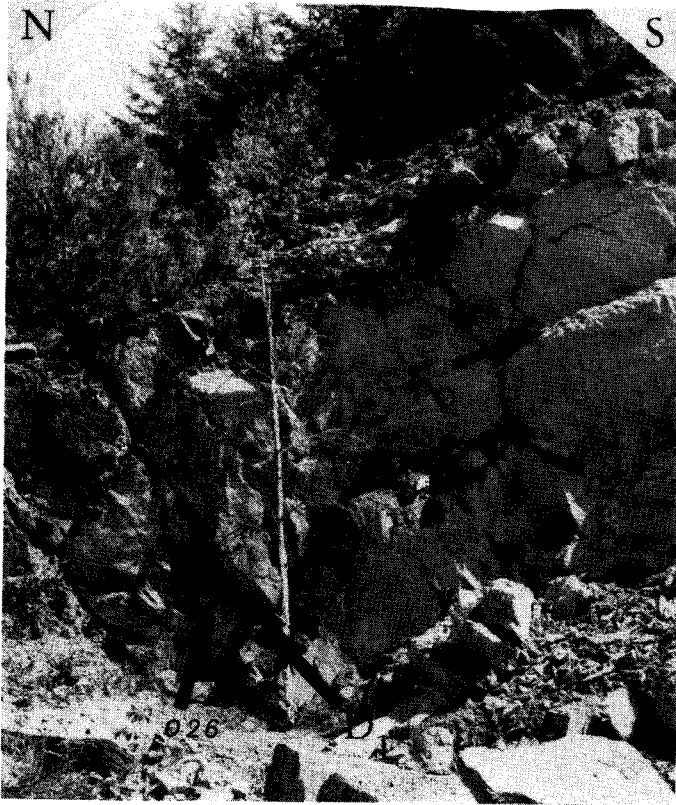
## PLANCHE PHOTO III

Mise en évidence de l'appartenance des fractures  
anormales à la famille  $D_1$  - relation avec  $S_0$  et  $D_2$

A) Cas de 026

B) Cas de 025

PLANCHE III



## 1.2. L'ANOMALIE DE LA ROUTE OIZY-BAILLAMONT (R.O.B)

### 1.2.1. LITHOSTRATIGRAPHIE

Lors de l'étude préliminaire, l'équipe de J.M. CHARLET a cherché à savoir si l'anomalie de la carrière avait des prolongements dans les talus de la R.O.B.

Du fait de l'orientation de la R.O.B., tangente à celle des couches de l'anticlinal d'Oizy et de la tectonisation visible dans la carrière, l'affleurement n'est pas des plus beaux.

Cependant, on peut proposer la colonne stratigraphique de la figure 94.

Ainsi qu'on peut le voir, la coupe de la R.O.B. est perturbée par le passage de la zone faillée de la carrière.

Du point de vue des faciès, on retrouve ici le même type de roches que dans la carrière : des grès argileux à stratifications entrecroisées, des quartzophyllades, des phyllades. A ceux-ci s'ajoutent quelques bancs de grès à tendance quartzitique à l'extrême Est de la coupe (fig. 95) (R.O.B. 45). Les bancs de grès observés au sein des phyllades de Levrézy sont de coloration bleutée à grise alors que ceux des quartzophyllades de Braux sont verdâtres.

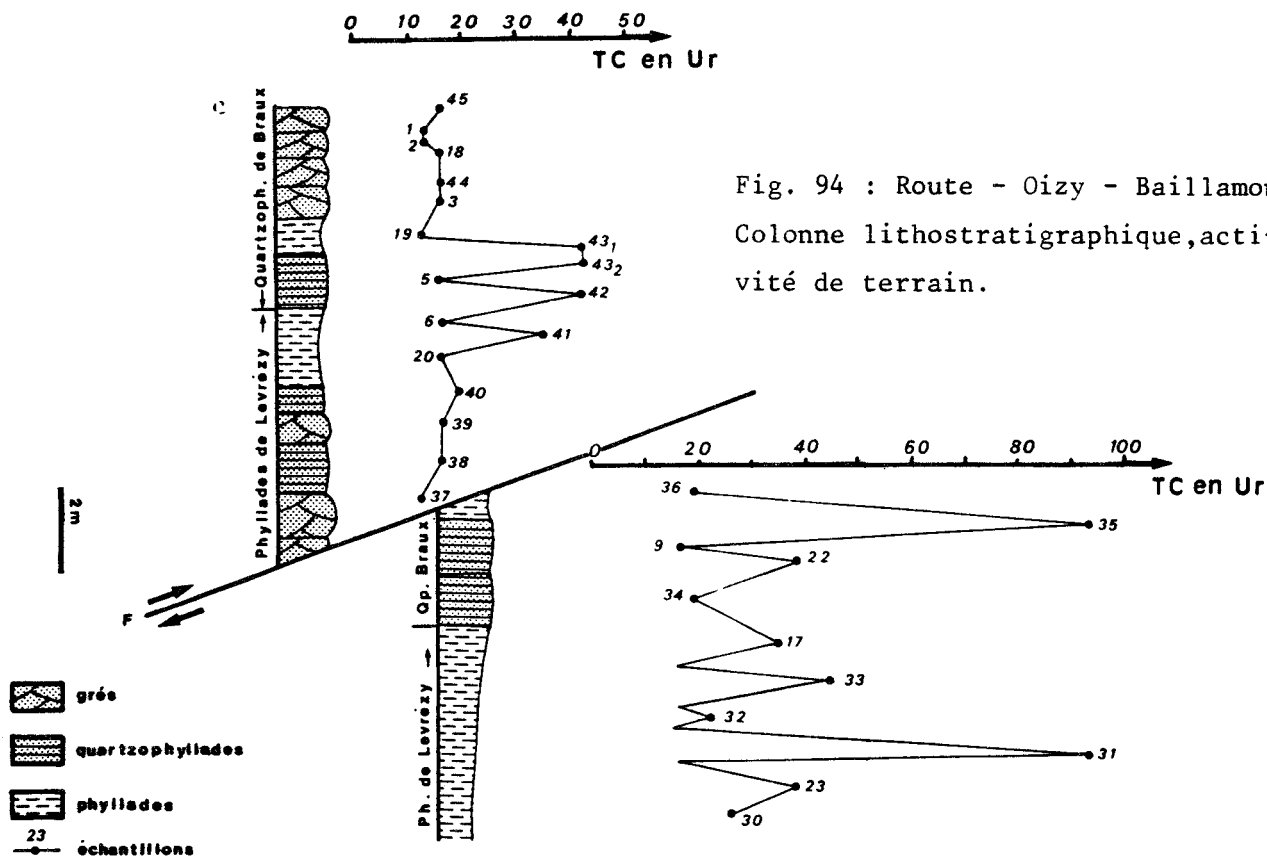


Fig. 94 : Route - Oizy - Baillamont  
Colonne lithostratigraphique, activité de terrain.

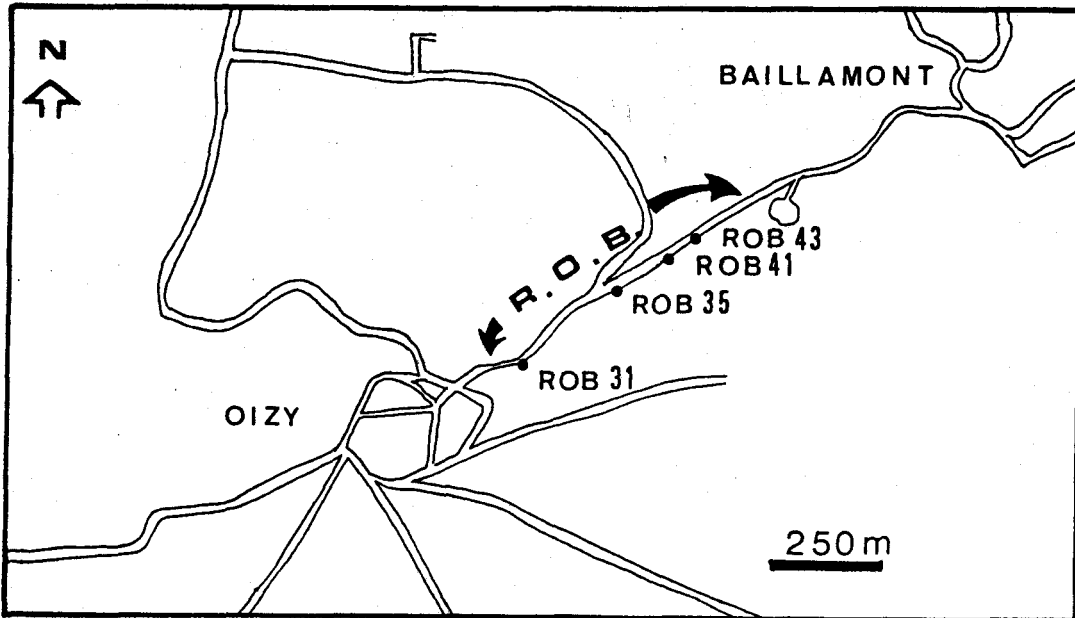


Fig. 95 : R.O.B. situation des pointements anomaux.

### 1.2.2. STRUCTURE

La structure est difficilement interprétable à partir de l'affleurement du fait de la mauvaise qualité de ce dernier.

La répétition du passage des phyllades de Levrézy aux quartzophyllades de Braux (fig. 94) permet de déduire la prolongation de la zone faillée de la carrière qui se prolonge vers l'Ouest au moins jusqu'à ce niveau. Ici aussi la fracturation est bien développée. La construction des rosaces (fig. 96) met en évidence les familles  $D_1$  et  $D_2$  déjà rencontrées dans la carrière (paragraphe I.1).

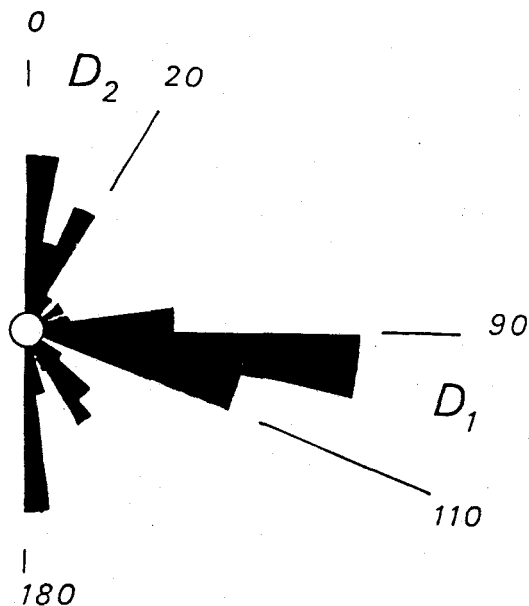
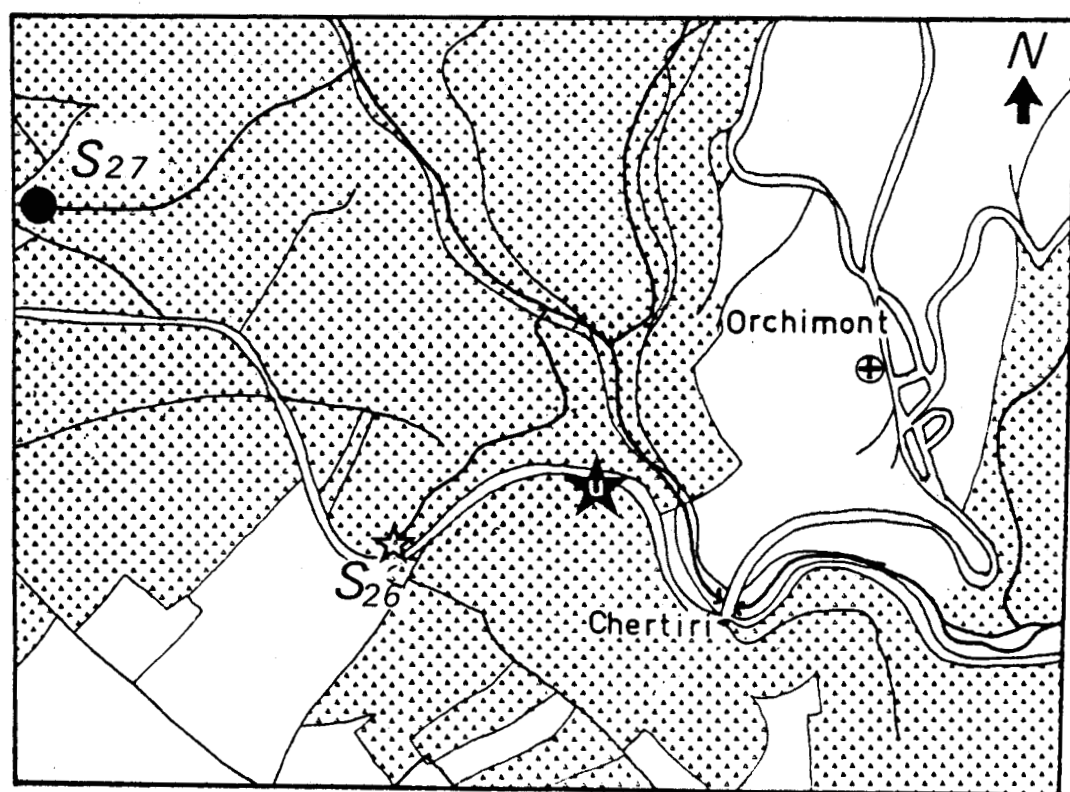






Fig. 96 : R.O.B., mise en évidence des directions de fracturation  $D_1$  &  $D_2$  (rosace réalisée sur 80 mesures).




### 1.2.3. LOCALISATION DE L'ANOMALIE

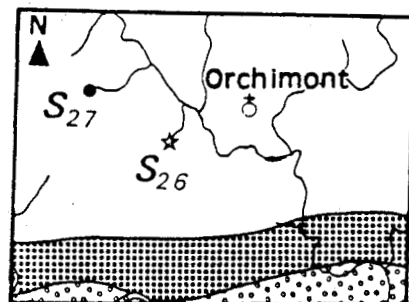
La lecture de la courbe des activités (T.C.) exprimées en U.r. à la figure 94 amène le même type de remarques que pour la courbe de la carrière. Les pics sont nombreux et apparemment pas liés à la stratigraphie, en aucun cas, je n'ai pu suivre une anomalie qui soit en relation avec une couche précise. De plus, ce n'est que très difficilement que j'ai pu mettre en évidence des fractures analogues à celles de la carrière. Lorsque cela a été possible, le peu de matière que j'ai pu y prélever semble être responsable de la radioactivité. Les mesures de direction de fracturation concordent avec celles faites dans la carrière : les fractures actives relevées ont la même orientation ( $D_1$ ).



250 m

-  Anomalie en Uranium
-  Anomalie en Radon
-  Sources
-  Sapinières

-  Gédinnien supérieur
-  Quartzophyllades de Braux
-  Phyllades de Levrézy



1km

Gédinnien inférieur



### 1.3. INDICE DE CHERTIRI

J'ai écrit en 2ème partie que la prospection radiométrique n'a pas mis en évidence d'autres anomalies sur le secteur d'étude. En un seul point, un indice a été relevé (fig. 97). Il s'agit d'un pointement anomal situé dans les phyllades de Levrézy, plus précisément dans des niveaux schisteux assez fins. La radioactivité de terrain monte à 33 Ur (à peine anormal), au niveau d'une fracture à faible remplissage limonitique. Cet indice a été confirmé par la prospection hydrologique qui a montré dans cette zone une légère anomalie en Radon (fig. 97 et 2ème Partie, Chap. II).

### 1.4. CONCLUSION

L'extension des anomalies radiométriques rencontrées est faible. Il est nettement visible sur le terrain que les fractures ouvertes à remplissage limonitique sont porteuses de l'anomalie. Ces dernières sont attribuées à une direction de fracturation régionale ( $D_1$ ).

A partir des résultats de terrain, il a donc été décidé d'étudier la radioactivité au sein des remplissages de fractures et des roches encaissantes. Une étude en spectrométrie gamma de laboratoire a été réalisée afin de déterminer les radioéléments responsables de l'activité mise en évidence sur le terrain.

◀ Fig. 97 : Situation du pointement anomal de CHERTIRI - ORCHIMONT.





## CHAPITRE II

SPECTROMETRIE GAMMA : DE LABORATOIRE

IN SITU





## CHAPITRE II.- ETUDES EN SPECTROMETRIE GAMMA

Les résultats des prospections radiométriques ainsi que ceux de la prospection Radon, les levés géologiques amenaient à orienter les travaux de recherche vers la spectrométrie gamma d'une part au laboratoire, d'autre part, sur le terrain. Le but était d'identifier le ou les radioéléments responsables des anomalies relevées et d'en mesurer les concentrations.

### 2.1. SPECTROMETRIE GAMMA DE LABORATOIRE

#### 2.1.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Dans cette étude, trois types d'échantillons ont été analysés :

- des roches,
- des remplissages limonitiques de fractures,
- des alluvions au voisinage des sources étudiées en prospection hydrochimique.

Les roches sont scindées en 2 grands ensembles :

- les échantillons provenant de la carrière d'Oizy (O.)
- les échantillons provenant de la Route-Oizy-Baillamont (R.O.B.).

Tous les prélèvements de roches (sauf cas particulier) ont été faits en évitant de prendre la partie altérée pour minimiser les phénomènes de lessivage liés à l'altération.

Dans la carrière, l'échantillonnage a été mené comme suit : une étude stratigraphique a donné lieu à un certain nombre de prélèvements. Ceci quelle que soit l'activité enregistrée sur le terrain.

L'étude radiométrique a amené à prélever une deuxième série d'échantillons en fonction de leur activité, sans tenir compte de leur faciès. Il est à noter que les épontes de chacune des fractures anormales (3ème P. Chap. I, fig. 92) ont été échantillonnées et orientées.

Sur la R.O.B., les choses ont été plus complexes. Les talus sont encombrés de gravas. Les couches de faciès différents ont été systématiquement échantillonnées. Au droit des pointements anormaux cartographiés (3ème partie, Chap. I, fig. 95), l'affleurement a été nettoyé afin de tenter de retrouver des fractures du type de celles de la carrière. Les épontes en ont été prélevées lorsque les fractures ont été dégagées. Sinon des échantillons de roches ont été pris.

Les remplissages de fractures ne sont malheureusement prélevables en quantité suffisante que dans la carrière d'Oizy. Sur la R.O.B., les traces de remplissage rencontrées n'ont pas autorisé la réalisation d'analyses en spectrométrie gamma :

- quantité trop faible,
- importante pollution par les formations superficielles.

Il est à noter que j'ai pu en deux cas échantillonner des remplissages de fractures en d'autres endroits : un à Chertiri (PAF 040), un à Bellefontaine (PAF 041).

Le premier est faiblement anomal sur le terrain, le second ne montre aucune activité anormale.

Les alluvions : lors de la prospection hydrochimique des sources, j'ai échantillonné les alluvions présentes au point de surgence. J'ai aussi ramassé les alluvions de ruisseaux dont j'ai analysé l'eau. En tout 16 échantillons, choisis de façon aléatoire, ont été analysés.

Au sein du laboratoire de la F.P. Ms, afin d'homogénéiser les conditions d'analyses et de rendre comparable les résultats, les échantillons sont traités de la façon suivante : ils sont broyés à l'aide d'un concasseur à mâchoires, puis d'un pulvérisateur de telle façon que la granulométrie soit inférieure à 300  $\mu$ m.

Afin d'éviter les contaminations, le matériel est nettoyé à l'air comprimé et à l'alcool entre chaque broyage.

Après homogénéisation (agitation manuelle) du matériel, 200 grammes sont prélevés pour le dosage. Dans le cas des fractures pour lesquelles les quantités de matière étaient insuffisantes, des dilutions ont été réalisées. Ceci était autorisé par l'activité relativement importante de ces sédiments. Une petite quantité de matière (20 à 100 g) a été mélangée pendant 12 heures avec un sable inerte (radiogéniquement) (180 à 200 g), la quantité totale des matériaux représente les 200 grammes requis.

L'étude présentée porte sur 90 échantillons : 12 fractures, 16 alluvions, 62 roches).

#### 2.1.2. PRESENTATION DE LA METHODE

La radioactivité naturelle des roches est attribuée aux éléments suivants : - l'Uranium (238U, 235U)

- le Thorium (232Th)

- le Potassium (40K)

Dans la nature, le rapport  $\frac{^{238}\text{U}}{^{235}\text{U}}$  est considéré comme constant et égal à 137,7.

Dans le milieu sédimentaire, l'Uranium précipite de préférence dans les zones réductrices. Le Thorium, peu oxydable, se rencontre surtout dans les minéraux lourds et les minéraux argileux. Les roches détritiques (BASHAM *et al*, 1982; MERCIER *et al*, 1982). Le Potassium est abondant dans les feldspaths alcalins et certaines argiles (illite). Les latérites riches en fer piègent facilement l'Uranium (CLARK *et al*, 1966) (fig. 5, 1ère p., Chap.II).

La spectrométrie gamma est basée sur l'émission des rayons gamma lors de la désintégration des radioéléments naturels.

L'énergie des rayons émis est caractéristique des radioéléments émetteurs alors que le nombre de particules gamma émises correspond à la concentration de l'élément dans le matériel considéré.

Une analyse spectrale du rayonnement permet d'identifier et de doser simultanément  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ .

Le dosage et l'identification de l'Uranium se font à partir de 3 raies :

- la raie à 295 keV
- la raie à 610 keV
- la raie à 1120 keV.

L'équilibre radioactif est établi à partir de la raie à 184 keV qui dépend de l' $^{235}\text{U}$  et la  $^{226}\text{Ra}$  (voir en 2-1.3.5.).

Le Thorium est dosé à partir de la raie à 930 keV.

Le Potassium à partir de celle à 1460 keV.

En annexe IV, on trouvera une description de la méthode d'analyse en spectrométrie gamma sur la chaîne de mesure développée à la F.P.Ms selon la méthode mise au point par Y. Quinif.

Les dosages sont faits en 3 fois 8 heures sur une période de 24 heures. La valeur présentée dans les tableaux est une moyenne des 3 mesures.

### 2.1.3. RESULTATS DES ANALYSES - INTERPRETATIONS.

#### 2.1.3.1. Etudes préliminaires, bruit de fond régional

Dans le cadre de la prospection radiométrique pédestre, un certain nombre d'échantillons ont été prélevés dans les zones assez éloignées des anomalies. Neuf d'entre eux ont été sélectionnés (fig. 98). Ils proviennent d'une part des levés de terrain réalisés par J.M. CHARLET lors de l'étude préliminaire



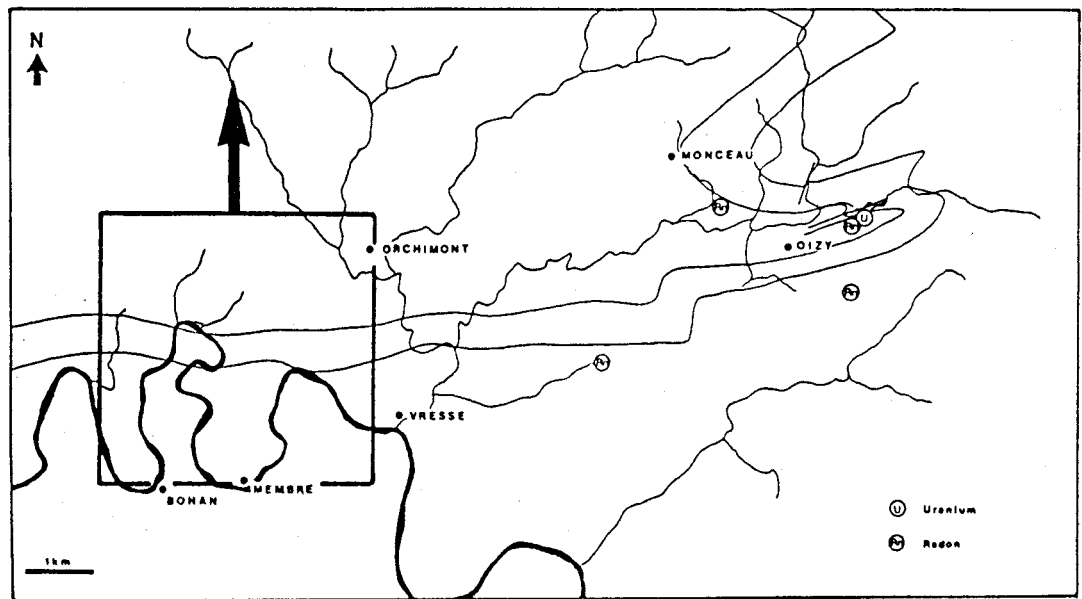
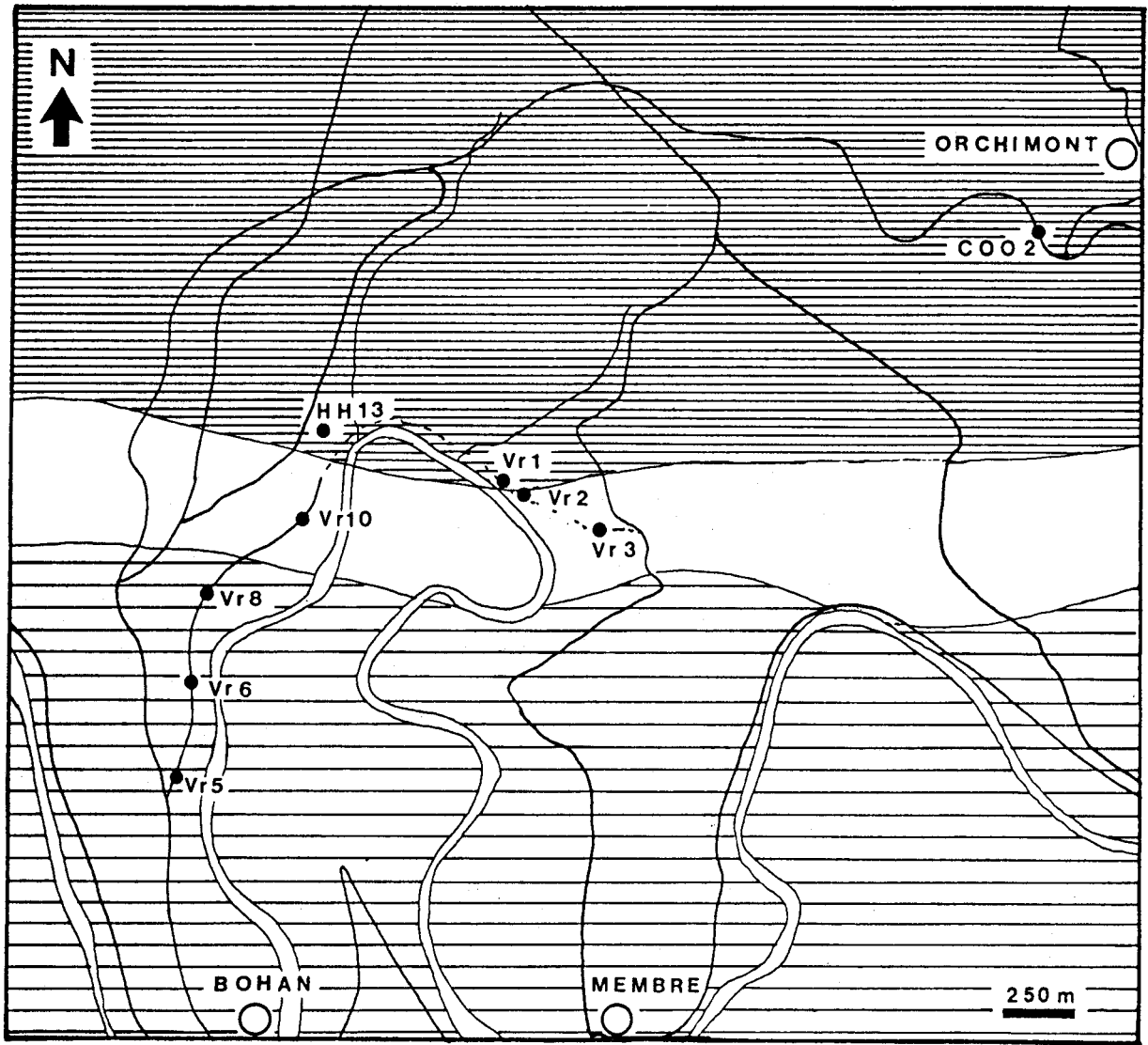
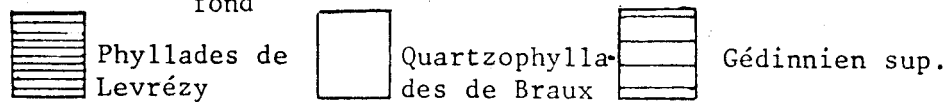


Fig. 98 : Situation des échantillons ayant servis à établir le bruit de fond



du contexte d'Oizy (éch. Vr), d'autre part pour 2 d'entre eux, des coupes que j'ai réalisées lors de ma prospection. Leur éloignement des indices, la fait qu'ils couvrent l'essentiel des formations étudiées et qu'aucune anomalie significative n'ait été relevée lors du prélèvement permettent de les utiliser pour établir le bruit de fond. Le tableau de la figure indique que ces roches ont des teneurs en radioéléments qui correspondent aux teneurs normales définies par CLARK *et al* (1966) ou GRANIER (1973) (1ère partie, Chap. II, fig. 5).

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	eU ppm	Th ppm	K %	Um ppm
Vr 001	Vr 1	3.3	10.8	2.77	3.4
002	2	2.6	13.5	3.28	2.9
003	3	3.1	10.6	2.81	3.1
005	5	2.5	13.2	3.48	2.5
006	6	2.9	13.6	3.42	3.1
008	8	2.6	5.9	0.98	2.8
010	10	3.8	8.8	1.23	3.9
PAO 044	HH 13	2.7	12.2	3.25	2.9
040	COO 2	2.9	13.0	3.74	2.6

Fig. 99 : Analyse en spectrométrie gamma des échantillons bruit de fond : tableau des résultats.

### 2.1.3.2. Analyse des remplissages de fracture (fig. 100)

Les remplissages de fractures semblent, sur le terrain, être responsables des anomalies (3ème partie, Chap. I). Sur les sites anomaux, seules les fractures de la carrière d'Oizy sont échantillonnables en quantité suffisante. Sur la R.O.B., leur accessibilité est beaucoup trop difficile et rend le prélèvement susceptible de pollution trop importante. En deux autres endroits, j'ai pu échantillonner un sédiment dont l'aspect était similaire à celui d'Oizy (fig. 100).

Les figures 100 et 101 nous confirment que le radioélément responsable des anomalies est l'Uranium (14,8 à 409 ppm d'Um).

OIZY : FRACTURES

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	Ur	eU (ppm)	Th (ppm)	K %	Um (ppm)	Ra/U
PAF 024	o 24 f	92.41	164	19	0.4	201	22.60
025	o 25 f	61.64	348	3.2	0.7	409	17.50
026	o 26 f	135.72	292	18.20	0.4	366	25.29
027	o 27 f	36.01	32.5	3.5	0.37	37	13.80
028	o 28 f	38.78	49	13	1.9	62	26.50
029	o 29 f	33.24	122	24.50	1.60	134.5	10.19
030	o 30 f	33.24	19.6	15.20	1.92	21.2	8.19
031	o 31 f	32.88	13	9	1.92	14.8	13.80
032	o 32 f	30.82	66.66	17.31	0.99	67.26	0.899
038	o 38 f	44.52	80	2.9	0.8	81	1.29

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	Ur	eU (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Um (ppm)	Ra/U
PAF 040	COO 5	32.88	13	14	0.01	18	38.5
041	BF1 F	17.12	5.5	10.8	1.92	5.5	0.

Fig. 100 : Analyse en spectrométrie gamma des remplissages de fractures - Résultats : A Carrière d'OIZY  
B Autres situations

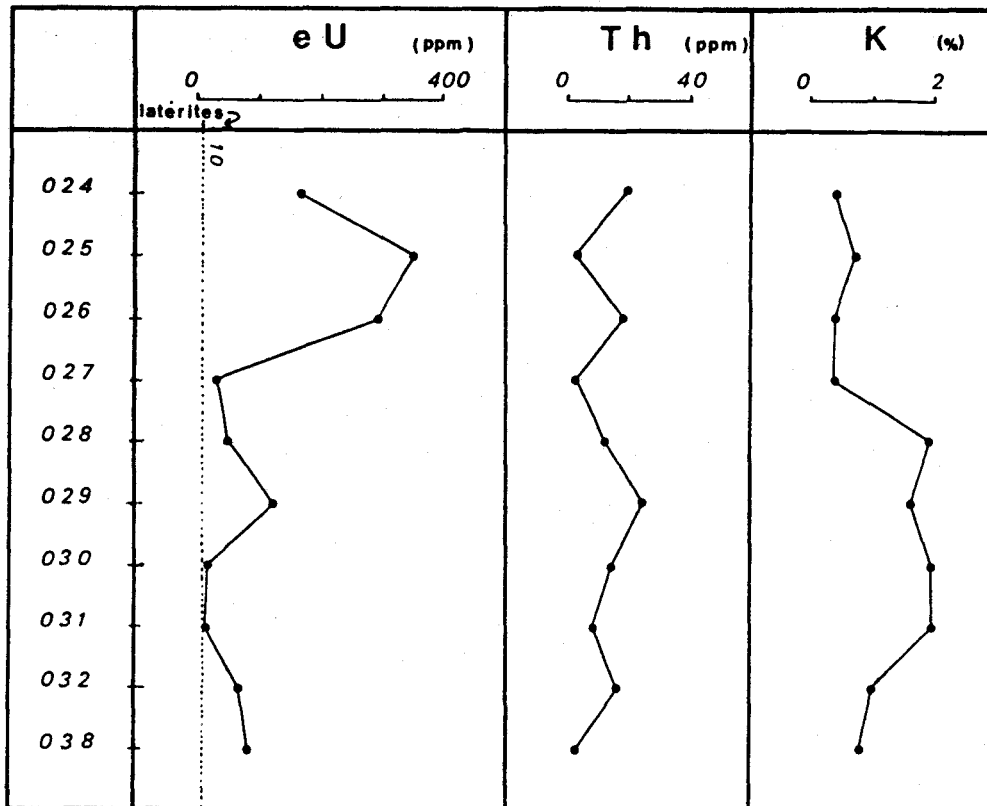


Fig. 101 : OIZY : présentation graphique des résultats de l'analyse en spectrométrie gamma.

### 2.1.3.3. ANALYSES DES ROCHES

#### 2.1.3.3.1. Carrière d'Oizy

Dans la carrière, 36 roches ont été analysées (fig. 102). Au sein de cet ensemble, deux types de distinctions peuvent être faits. Dans un premier temps, on peut considérer les faciès :

- 14 grès
- 17 quartzophyllades
- 5 phyllades

Dans un second temps, il est possible de distinguer les roches saines peu ou pas fracturées, des épontes de fractures, c'est-à-dire des roches plus altérées, microfissurées, directement au contact de l'anomalie.

- Au sein des grès les teneurs en Uranium (Um) varient de 2,9 à 52 ppm. Le clarke est de 2 à 3 ppm.

Sur les 14 échantillons de ce type, 10 ont des teneurs fortes ou anormales. Si leur position par rapport aux fractures est prise en compte, on constate que les teneurs les plus fortes sont enregistrées dans les

épontes ou dans les zones fortement fracturées. Dans le cas de P.A.O.007 et P.A.O.008, il s'agit de 2 échantillons de la même couche, le premier étant nettement plus altéré que le second.

Les teneurs en Th et  $K_2O$  sont fortes comparativement aux clarkes. On peut avancer une première explication en précisant que le ciment de ces grès est presque toujours argileux.

- Les quartzophyllades sont des roches à nette tendance argileuse. Ceci se traduit par un enrichissement en Th et  $K_2O$ .

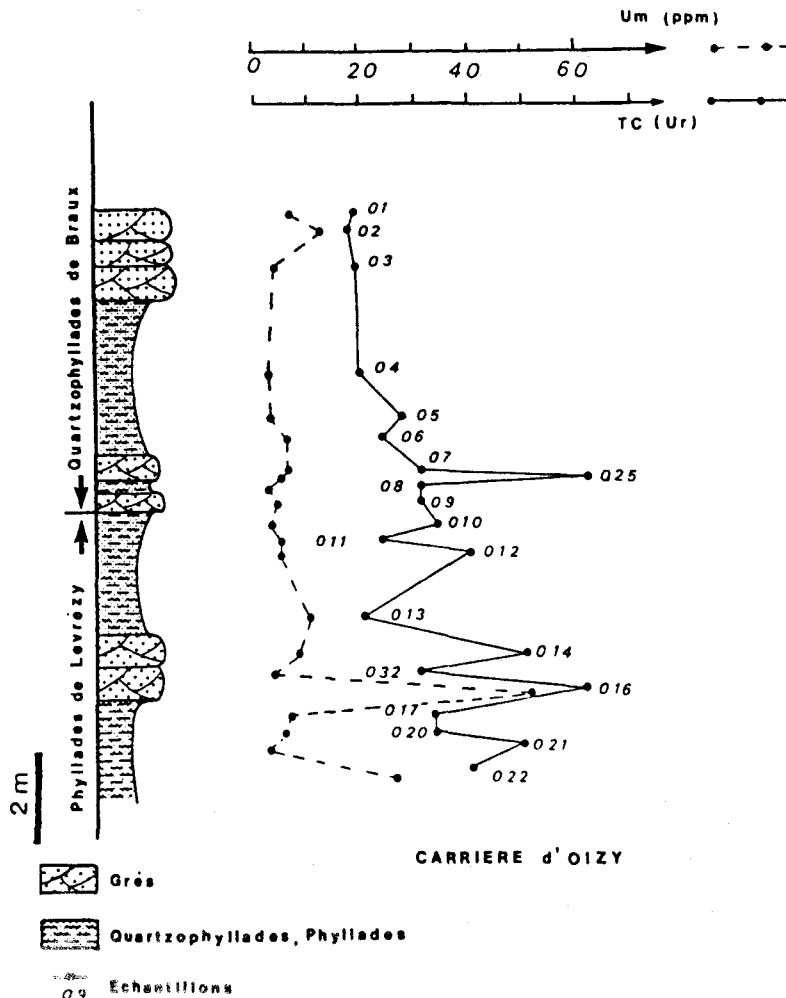
Les teneurs en Um sont en moyenne plus faibles que dans les grès étudiés. Comme pour ces derniers, les plus fortes concentrations semblent à raccorder à la fracturation qu'à la sédimentation.

- Les phyllades : la tendance arénacée de ces roches tend à s'effacer devant le caractère pélitique. Les teneurs normales de ces types de roches sont : 4 à 8 ppm d'U,

16 ppm de Th,

2,7 % de  $K_2O$

Ceci amène à constater que, des 5 échantillons analysés, un seul peut être considéré comme anomal. Une fois encore, il s'agit d'une éponte de fracture (P.A.O. 028).



Les anomalies sur roches relevées dans la carrière d'Oizy sont attribuables à l'Uranium. J'ai donc tracé (fig.103), en relation avec la colonne lithostratigraphique de la carrière, les courbes de radiométrie de terrain et de répartition de l'Uranium métal. On constate que les tracés ne concordent qu'en peu de points. Ceci tend à corroborer la grande influence des remplissages de fractures sur la radioactivité de terrain.

#### 2.1.3.3.2. La route Oizy-Baillamont (R.O.B.)

24 échantillons ont été analysés sur cette coupe :

- 7 grès,
- 10 quartzophyllades,
- 7 phyllades.

J'ai déjà abondamment commenté les difficultés d'observation le long de cette coupe. Lors du levé scintillométrique, le détecteur met en évidence des anomalies que le prospecteur cerne difficilement. Cependant, les résultats obtenus sont à rapprocher de ceux de la carrière. Des fractures minéralisées ont été observées sur le terrain (fig. 104). La mise en parallèle des courbes d'activité (fig. 105) sur le terrain et de concentration en Um donne des résultats assez inégaux.

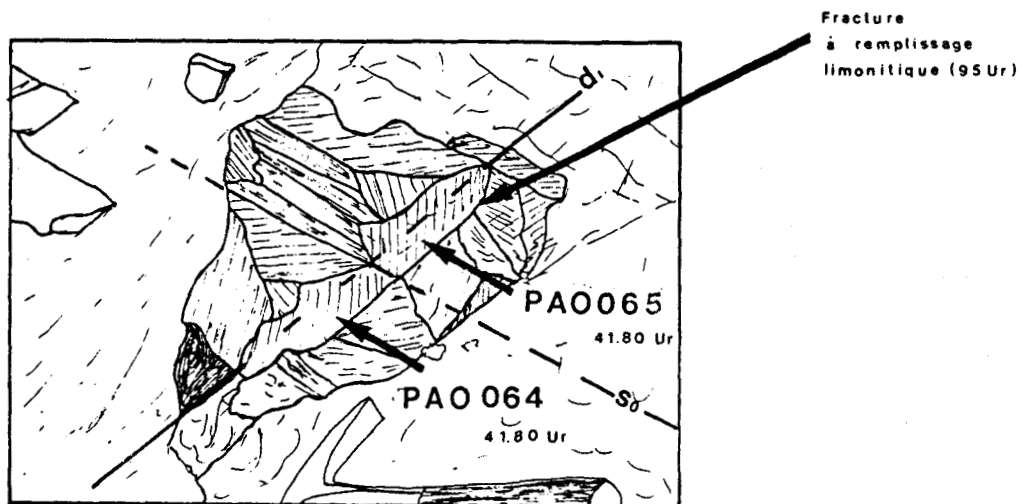


Fig. 104 : R.O.B. : fracture dégagée dans le talus de la route (R.O.B. 35).

◀ Figure 103 : OIZY  
comparaison entre la radioactivité de terrain et la teneur en Um .

R O B : ROCHES

N° ORDINAT.	N° TERRAIN	U <sub>r</sub>	eU ppm	Th ppm	K %	Um ppm	R <sub>a</sub> /U
045	ROB 17	41.10	4.6	11	2.66	5.3	15.19
046	1	17.12	4.6	14.3	2.26	3.7	-19.5
047	2	20.55	5.0	14.3	3.3	3.4	-31.8
048	3	17.10	3.3	11.5	1.78	3.2	-2.90
049	8	44.52	16.6	10.6	2.26	16.5	-0.5
050	9	41.10	20.9	12.5	3.22	21.2	1.399
051	14	34.25	5.8	8.7	0.86	6.8	17.20
052	15	41.10	11.2	13.90	2.36	12.1	8.0
053	18	14.46	3.3	14.6	1.03	4.6	39.40
054	19	16.07	3.5	11.30	1.01	3.9	11.39
055	20	16.07	3.6	12	4.2	3.9	8.30
056	21	18.64	3.9	12.2	3.68	3.6	-7.59
057	22	18.64	37.4	12.0	2.76	39.9	6.699
058	23	28.43	16.7	10.0	2.37	16.2	-2.90
059	30	25.72	7.4	11.7	2.9	6.75	-8.69
060	31	93.24	3.3	9.6	2.1	3.7	12.10
061	34	19.29	4.1	7.2	1.08	4.7	14.60
062	35	28.93	12.3	0.08	1.5	12.3	0.0
063	36	19.29	3.8	10.9	2.1	3.98	4.699
064	43a	41.80	15.10	11.7	3.5	16.50	9.300
065	43r	41.80	44.90	7.9	2.4	44.80	-0.100
066	44	16.07	4.5	8.5	1.65	4.65	3.299
067	45	16.07	3.3	10.8	1.2	3.5	6.099
068	41	41.80	11.4	11.1	2.6	11.9	0.6

Fig. 106 : Route Oizy Baillamont : résultats de l'analyse en spectrométrie gamma des roches.

OIZY : ROCHES

N° ORDINAT.	N° TERRAIN	U <sub>r</sub>	eU ppm	Th ppm	K %	Um ppm	R <sub>a</sub> /U
PAO 001	0	18.94	6.9	8.5	0.95	7.6	10.10
002	2	13.8	17	3.86	3.86	13.9	0.699
003	3	18.94	4.0	7.7	1.74	4.1	2.5
004	4	19.86	2.1	12.5	3.25	3.1	47.59
005	5	27.40	3.9	12.3	3.65	3.7	-5.0
006	6	23.97	6.1	13.4	3.22	6.5	6.599
007	7	30.82	6.3	9.1	1.42	6.5	3.20
008	8	30.82	2.5	9.6	1.79	2.9	16
009	9	30.82	3.8	10.7	2.08	4.5	18.39
010	10	34.25	3.9	11.1	2.17	3.5	-10.1
011	11	23.97	5.0	11.6	2.99	5.3	6
012	12	41.10	4.8	12.1	2.99	5.1	6.19
013	13	21.23	10.5	11.5	2.86	10.7	1.899
014	14	51.37	7.5	9.4	1.74	8.5	13.30
015	15	51.37	12.20	12.2	3.19	12.7	4.09
016	16	61.64	49.3	9.1	2.00	52.0	5.5
017	17	34.25	7.16	11.8	2.77	6.9	-3.5
018	18	34.25	7.5	10.4	2.19	7.6	1.29
020	20	44.52	5.6	12.4	3.48	5.4	-3.5
021	21	41.10	5.3	14.2	3.48	3.46	-34.50
022	22	41.10	26.60	11.60	3.25	27.20	2.299
023	23	18.94	5.5	11.1	2.73	6.6	20
024	24r	41.10	20.0	11.4	2.79	20.9	4.5
025	25r	30.82	4.6	9.4	1.49	5.4	17.39
026	26r	24.93	20.10	9.9	2.16	21.8	8.50
027	27r	30.82	7.7	10.5	2.41	8.7	13
028	28rs	24.93	19.3	12.1	2.73	21.6	11.89
029	29rs	24.93	9.01	6.0	7.7	8.0	-11.10
030	30r	24.93	9.3	9.7	1.97	11.2	20.39
031	31r	24.93	9.5	9.0	2.03	8.7	-8.3
032	32r	30.82	4.67	11.8	3.19	3.20	-8.3
033	33	24.93	9.0	12.4	1.72	9.9	10
035	35	24.93	3.6	9.0	2.0	3.90	8.3
038	38r	24.93	8.7	12.9	3.65	9.4	8
042	28rn	24.93	28.6	12.8	3.65	29.3	2.40
043	29rn	24.93	9.2	8.6	1.19	9.5	3.29

Phyllades      Quartzophyllades      Grès

Fig. 102 : Carrière d'OIZY, résultats de l'analyse en spectrométrie gamma des roches.



D'une manière générale, les pics de la courbe de terrain correspondent à des épontes de fracture qui peuvent ou non présenter des teneurs anormales en radioéléments (fig. 106).

Les remarques que l'on peut faire à propos de ces faciès sont similaires à celles que j'ai faites en 2.1.3.3.1., à savoir qu'indifféremment des faciès analysés (fig. 105), on ne peut attribuer les anomalies en radioéléments à une couche particulière mais plutôt à une zone fracturée. Ce qui est clair c'est que le réseau de fractures à remplissage limonitique est ici moins dense que dans la carrière. Lorsque l'une d'entre elles peut être étudiée sur le terrain, son contenu n'est pas échantillonnable en quantité suffisante pour autoriser une spectrométrie gamma.

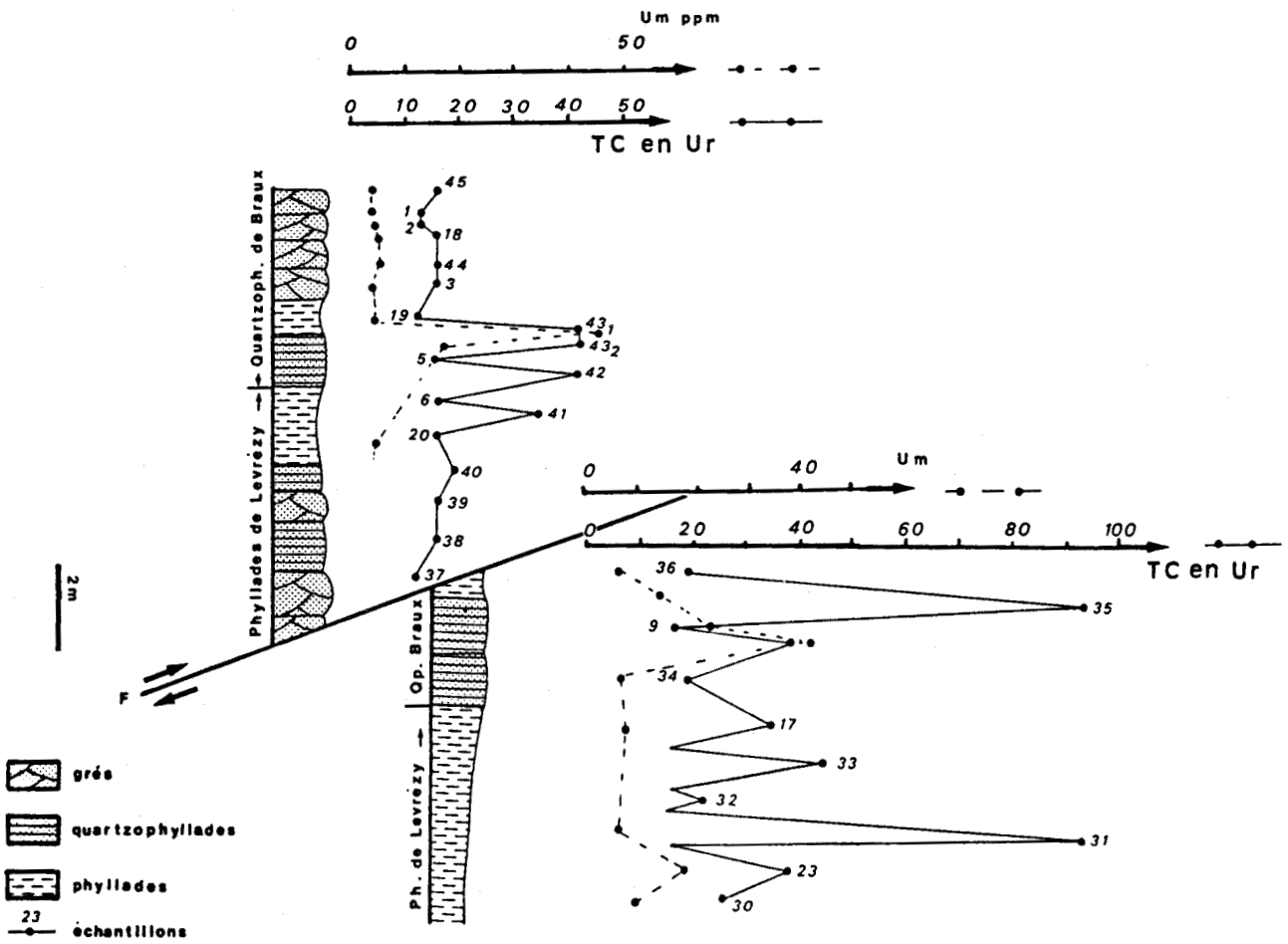


Fig. 105 : Route - Oizy - Baillamont : comparaison entre l'activité de terrain et la teneur en Uranium métal.

#### 2.1.3.4. ANALYSE DES ALLUVIONS

La prospection hydrochimique du Radon a mis en évidence des anomalies. Il s'est donc avéré intéressant de chercher à savoir si les alluvions étaient aussi anormales.

Lors de la prospection en Uranium du Paléozoïque belge, l'équipe du Professeur H. MARTIN a réalisé une prospection de type "stream sediment". De la cartographie réalisée, je tire la figure 107 (d'après H.MARTIN,

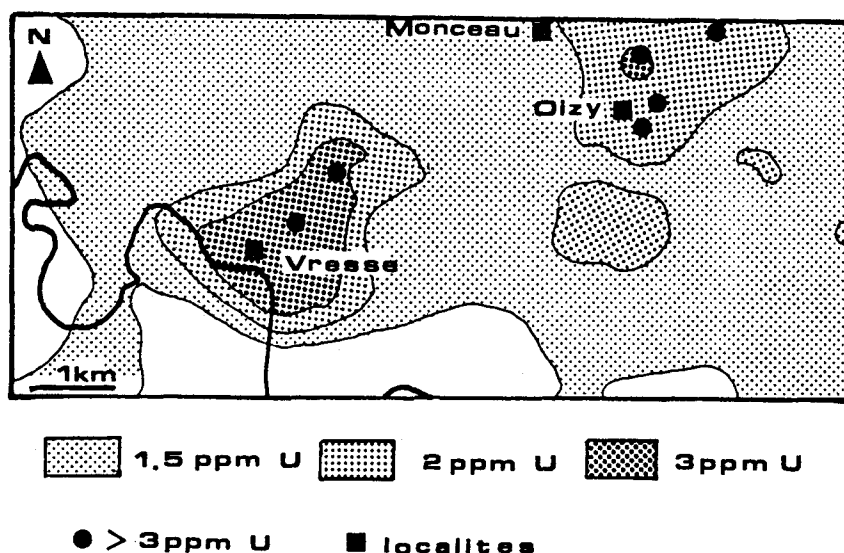


Fig. 107 : Carte des concentrations en Uranium dans les sédiments de surface (extrait des travaux de H. MARTIN in J.M. CHARLET et al. 1983)

1983, in J.M. CHARLET et al, 1983). Deux zones semblent devoir être retenues (Vresse et Oizy) qui montrent des concentrations allant localement au delà de 3ppm. Cet auteur présente des résultats portant sur plus de 10.000 analyses d'échantillons d'alluvions provenant de toute l'Ardenne belge. On peut considérer que les moyennes de concentration qu'il présente sont donc représentatives. Il donne pour le Paléozoïque dans son ensemble une teneur moyenne de 1,06 ppm d'U, pour le Gédinnien de la région de Gédinne 1,73 ppm d'U. Il est important de savoir que ces analyses passent par une mise en solution de l'Uranium; ce qui peut expliquer en grande partie le décalage existant entre ces valeurs et celles que je présente (fig. 107 et 108).

En effet, il n'est pas évident que la totalité de l'Uranium présent

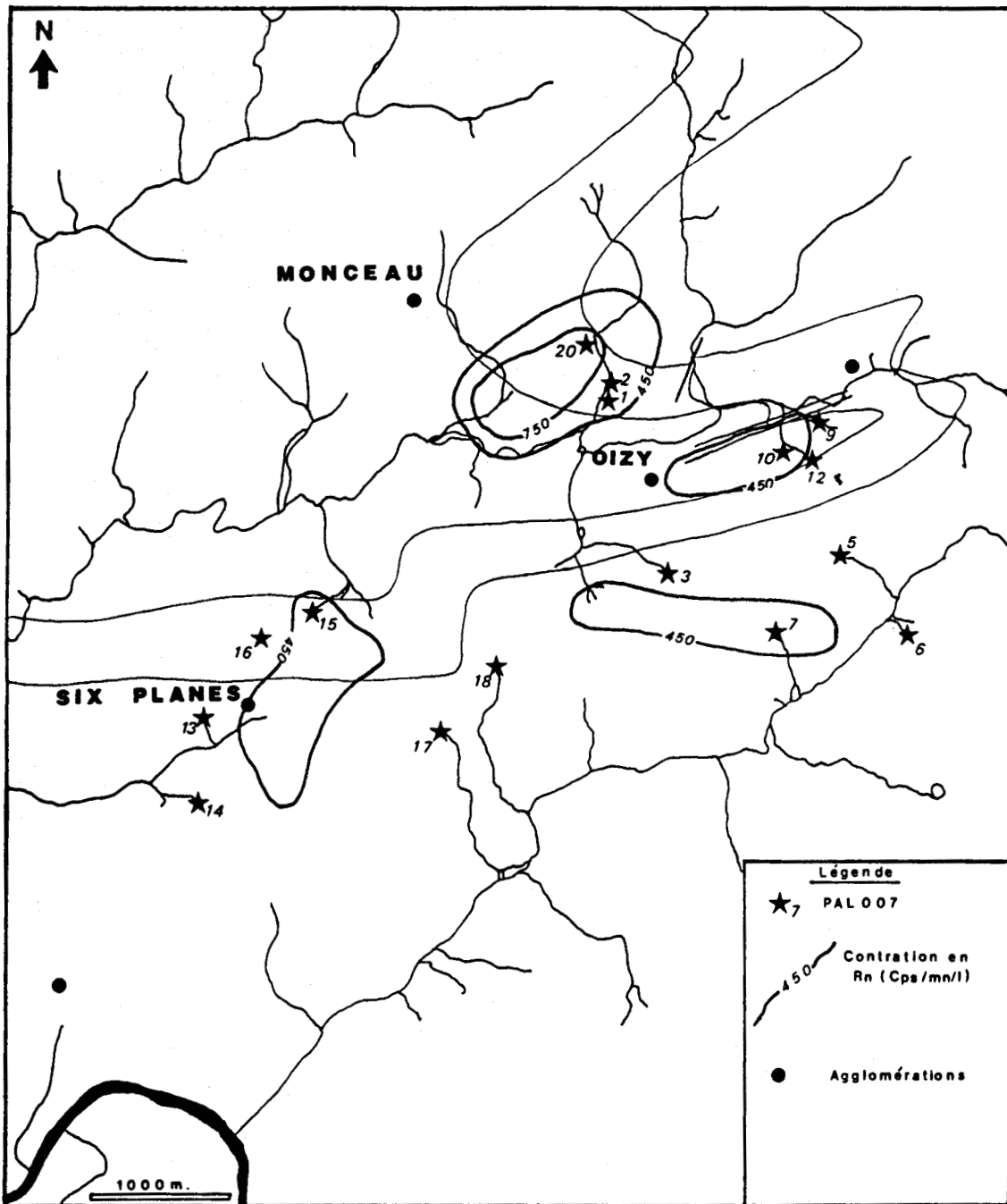


Fig. 109 : Situation géographique des P.A.L. analysés en spectrométrie gamma - Position des principales anomalies Radon.

dans le sédiment passe en solution; en spectrométrie gamma, on dose le rayonnement émis par tous les radioéléments présents.

La figure 109 localise les échantillons des analyses de la fig. 108. Seules les teneurs en Uranium sont parfois anormales. Si on considère que pour ces analyses le bruit de fond régional est de l'ordre de 3ppm, 6 des

ALLUVIONS

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	eU (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Um (ppm)	Ra/U
PAL 001	AL 1	4.7	7.7	1.79	4	-14.8
002	2	4.7	9.6	1.84	3.9	-16.8
003	3	8.1	13.1	2.02	6	-25.7
005	5	4.3	9.3	1.56	3.8	-11.5
006	6	1.6	5.5	1.27	1.7	6.3
007	7	6.2	6.6	1.09	4.8	22.5
009	9	4.5	5.8	1.07	4.3	-4.3
010	10	5.4	8.1	1.1	5.3	-1.79
012	12	4.3	8.4	1.93	3.4	-53.5
013	13	4.6	11.5	1.46	3.7	-19.5
014	14	6.0	18.5	1.38	4.5	-24.8
015	15	2.8	5.2	1.53	2.5	-10.6
016	16	3.8	9.3	1.56	4.2	10.5
017	17	2.3	9.7	1.5	2.3	0
018	18	7.12	16.1	1.76	5.8	-18.3
020	AL 20	5.0	6.8	1.75	4.8	-3.9

Fig. 108 : Analyse en spectrométrie gamma - Tableau des résultats des analyses d'alluvions (P.A.L.).

16 échantillons présentent des teneurs anormales en Uranium (PAL 003, 007, 010, 014, 018, 020).

La comparaison des figures 107 et 109 (et de la figure III hors-texte) semble montrer une concordance entre les divers résultats : les fortes teneurs en Radon paraissent se répartir selon la même géométrie que les fortes teneurs en Uranium relevées par H. MARTIN. Mes analyses en spectrométrie gamma suivent la même logique. La dérive observée des anomalies

en stream sédiment est due au caractère migrant des alluvions et de l'uranium solubilisé en leur sein alors que dans le cas de la prospection Radon, le fait d'étudier les points de sources semble minimiser le phénomène.

2.1.3.5. Etude du déséquilibre radioactif

$^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et le  $^{232}\text{Th}$  sont les éléments de tête de trois familles de radioisotopes descendants les uns des autres, le stade final étant le plomb qui lui est stable.

En fig. 110, on trouvera la famille de  $^{238}\text{U}$ . Le nombre atomique (Z) est donné en fonction du nombre de masse (N). La période ou demi-vie caractérise chacun des descendants.

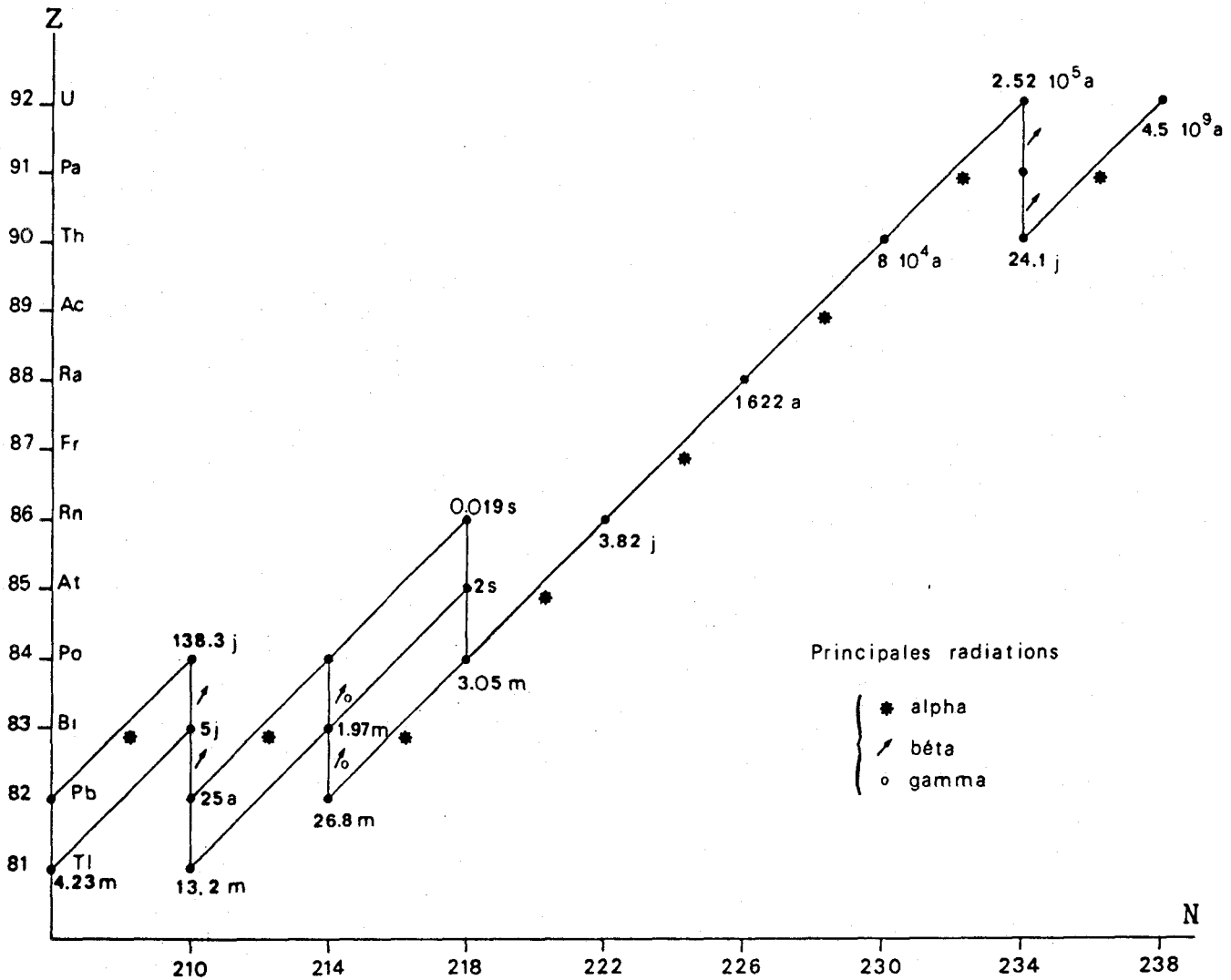


Fig. 110: La famille de l'uranium 238

Z= nombre atomique

N= nombre de masse.

Pour les radioéléments naturels, un équilibre s'établit au bout d'un temps de l'ordre de 10 fois la période des descendants successifs. L'équilibre est établi lorsque le nombre de désintégrations par unité de temps est le même pour tous les descendants. Considérant ce fait, on notera l'importance de la période des éléments pour le temps nécessaire à la mise en équilibre.

Ainsi la famille du  $^{232}\text{Th}$  est à l'équilibre au bout de 70 ans alors que celle de  $^{238}\text{U}$  demande 1 million d'années. Ceci est dû à la présence dans la chaîne de désintégration d'un élément à longue période :

- $^{234}\text{U}$  avec  $2,52 \cdot 10^5$  ans
- le  $^{230}\text{Th}$  avec  $8 \cdot 10^4$  ans.

La famille du Thorium est toujours à l'équilibre, ce qui permet le dosage de l'élément de tête par l'un quelconque des maillons de la chaîne. L'Uranium est plus complexe à doser, l'équilibre n'étant pas toujours atteint. Les descendants de  $^{238}\text{U}$  appartiennent à diverses classes du tableau périodique. Leurs comportements physico-chimiques sont donc très différents :  $^{222}\text{Rn}$  est un gaz, le  $^{226}\text{Ra}$ , un alcalino-terreux (BALEINE *et al*, 1976).

Le fait que la prospection des gîtes uranifères soit basée sur l'étude des rayonnements des isotopes à courte vie (tels le  $^{214}\text{Bi}$ ) rend l'étude du déséquilibre radioactif très importante. Ceci afin de limiter les erreurs d'estimation de teneurs que ce soit par excès ou par défaut.

Dans la technique d'analyse mise au point à la F.P. Ms, on détermine le rapport entre l'Uranium calculé (eU : équivalent Uranium) à partir de ses descendants (Radium, sur la raie à 352 keV) et l'Uranium métal (Um) (raie à 184 keV) réellement présent dans l'échantillon. On voit donc qu'un déséquilibre se traduit par un rapport  $\text{Ra}/\text{U} \neq 1$ . Il peut illustrer un enrichissement en Radium, soulignant un départ préférentiel de l'Uranium facilement soluble. Un enrichissement en Uranium indique qu'on a affaire à une famille non encore à l'équilibre, ou que ses descendants ont migré.

Dans les tableaux de résultats, le rapport  $\text{Ra}/\text{U}$  est obtenu par le calcul suivant :  $\text{Um} - \text{eU}$  exprimé en pourcent. Entre 0 et  $\pm 10\%$ , l'équilibre est considéré comme réalisé. L'examen des tableaux amène diverses réflexions selon le type d'échantillons considéré.

- Les échantillons de fracture (P.A.F.) (fig. 100 et 101).

Sur 12 analyses présentées, 7 sont nettement en déséquilibre positif, ce qui traduit un excès d'Uranium métal. De tels déséquilibres

peuvent être dus au fait que les apports d'Uranium dans ces sédiments sont relativement récents et que la mise à l'équilibre n'a pas encore eu le temps de se réaliser. De part les valeurs du déséquilibre calculées, une analyse en spectrométrie alpha (3ème partie, Chap. III) de certains échantillons a été réalisée dans la suite de l'étude.

- Les roches (P.A.O.) (fig.102 et 106).

Onze d'entre elles, sur les soixante deux analysées, montrent un déséquilibre important (9 positifs, 2 négatifs). Il est à noter que dans la majorité des cas les échantillons concernés n'ont pas des teneurs anormales en Uranium. Seul le P.A.O. 030 échappe à cette règle (fig.102). Il s'agit d'une éponte de fracture (P.A.F. 030). L'enrichissement en Uranium métal des fractures gagnerait la roche et se traduirait par le déséquilibre enregistré (20,39 %). Si on considère l'ensemble des neuf déséquilibres positifs, on peut avancer ce type d'interprétation car les échantillons concernés sont soit des épontes de fracture (P.A.O. 025 et P.A.O. 030), soit situées dans un contexte très fracturé.

Les deux cas de déséquilibre négatif sont à mettre au compte du lessivage et de l'altération.

- Les alluvions (P.A.L.) (fig. 108).

Sur 16 échantillons traités, 9 sont en déséquilibre négatif. Ceci traduit un déficit en Uranium métal. Les sédiments récents (plioquaternaires) ont été et sont encore abondamment lessivés par les eaux de surface. L'Uranium étant un élément très soluble, il est préférentiellement entraîné par les eaux.

2.1.3.6. Radioactivité totale (Ur) et concentration en Um

L'Uranium est le principal responsable de la radioactivité enregistrée sur le terrain (Ur). De ce fait, et connaissant les résultats de M. NDZIBA (1982) et L. DORCHIES (1984), j'ai établi la corrélation entre la radioactivité de terrain (Ur) et la concentration en Uranium métal (Um).

La figure 111 donne la corrélation  $U_m = f(U_r)$  pour l'ensemble des échantillons P.A.O. et P.A.F. Le coefficient de corrélation ( $R = 0,55$ ) n'est pas bon quoique significatif. La majorité des échantillons se place à la base de la droite qui a une abscisse à l'origine de 15 Ur environ. Ceci signifie d'une part que l'Uranium est le principal responsable de la radioactivité "vue" sur le terrain et, d'autre part, que les autres radioéléments (Th, K) ont une contribution non négligeable. Ce dernier point est dans la ligne des résultats des 2 auteurs cités plus haut.



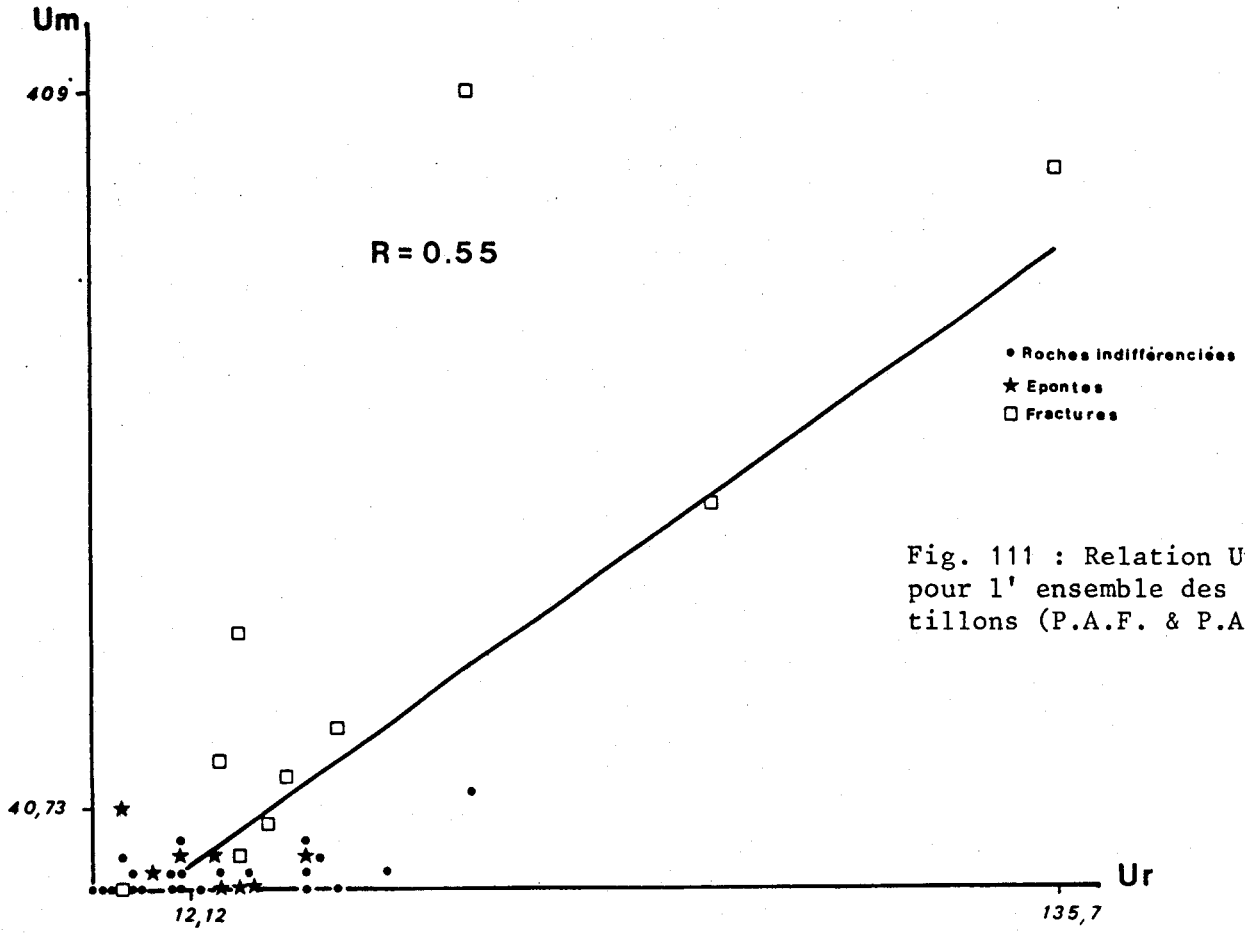


Fig. 111 : Relation Um - Ur pour l'ensemble des échantillons (P.A.F. & P.A.O.).

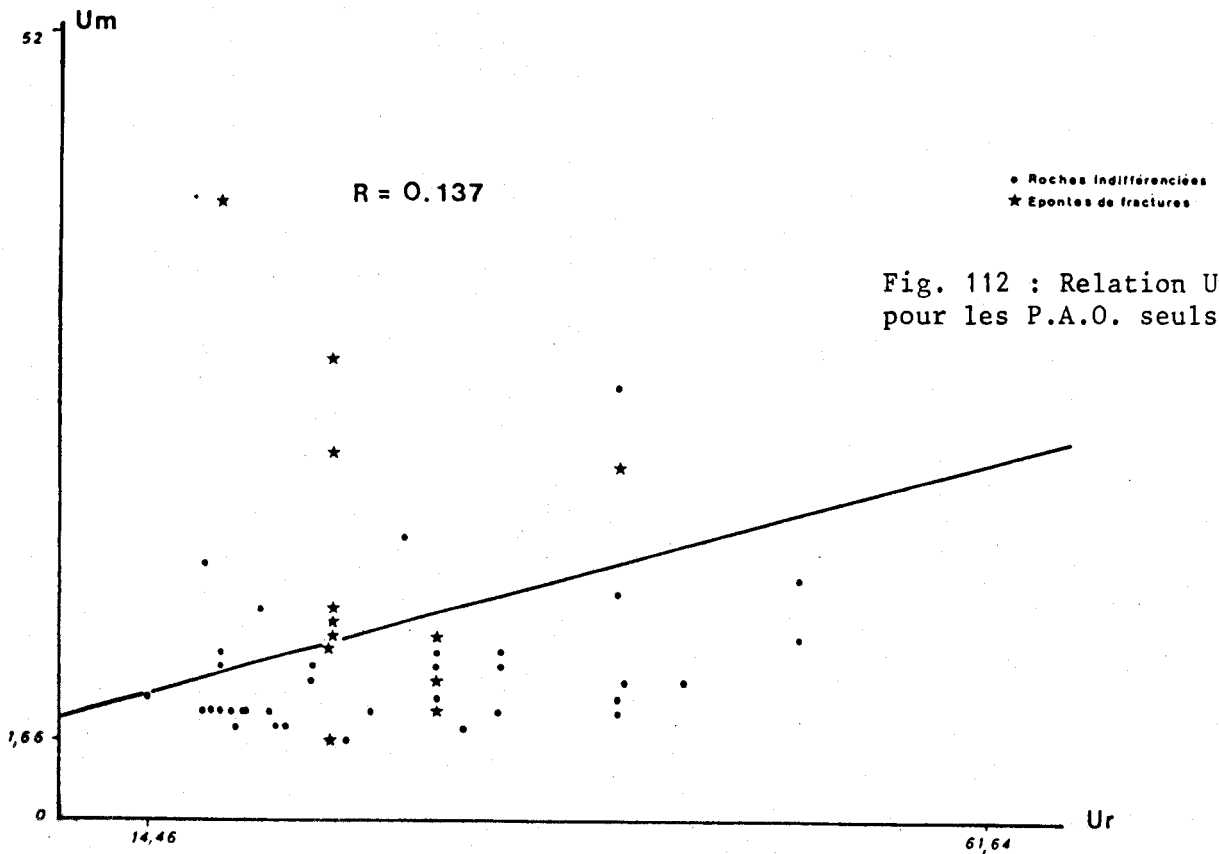


Fig. 112 : Relation Um - Ur pour les P.A.O. seuls.

La grande dispersion des points, le fait que 2 grandes catégories d'échantillons sont traités sur cette courbe, m'a amené à considérer la relation  $U_m = f(U_r)$  pour les P.A.O. seuls (fig.112).

Cette fois le coefficient de corrélation est mauvais ( $R = 0,137$ ). Une explication peut être avancée. Elle est liée à l'effet de la géométrie de l'affleurement (fractures localisées) joint à la zone d'investigation des scintillateurs. J'ai évoqué, en 3ème Partie, Chapitre I, 1.1.3, les effets de la géométrie sur les mesures d'activité. La dispersion des échantillons autour de la droite peut être due à 2 faits :

- l'activité de terrain est commandée par la présence d'une fracture à proximité du point de mesure (c'est le cas le plus courant);

- la concentration en  $U_m$  à l'échelle de l'échantillon analysé est supérieur à celle qu'enregistre le détecteur. C'est le cas des éponges de fracture par exemple.

En conclusion, ce qui est remarquable, c'est la nette amélioration de la valeur du coefficient de corrélation selon qu'on considère les P.A.O. seuls ou l'ensemble P.A.O. et P.A.F. Ceci corrobore la grande influence, sur le terrain, de l'activité des fractures minéralisées.

## 2.2. SPECTROMETRIE GAMMA IN SITU

### 2.2.1. INTRODUCTION

J'ai présenté en deuxième partie, Chapitre II, l'anomalie dite de Monceau. Elle a été mise en évidence lors de la prospection hydrochimique et lors de l'étude émanométrique.

Grâce à cette dernière technique, j'ai mis en évidence une augmentation des teneurs en Radon dans la partie Ouest du site (2ème partie, Chapitre II, 2.3.3) fig. 113). Il était donc tentant de réaliser quelques forages à la tarière dans cette zone en vue d'atteindre le "bedrock". L'idéal aurait été de le faire dans le triangle déterminé par  $P_2$ - $P_3$  et la route Oizy-Monceau (fig.113). Malheureusement, des raisons techniques, liées aux occupations de terres agricoles, ont rendu la chose impossible. La zone située immédiatement au Sud a été choisie. Des mesures en spectrométrie gamma ont été réalisées en cours de forage, simultanément des échantillons ont été prélevés pour des mesures de laboratoire.

### 2.2.2. PRINCIPE DE LA SPECTROMETRIE GAMMA IN SITU

C'est celui de toute spectrométrie gamma. L'appareillage est celui

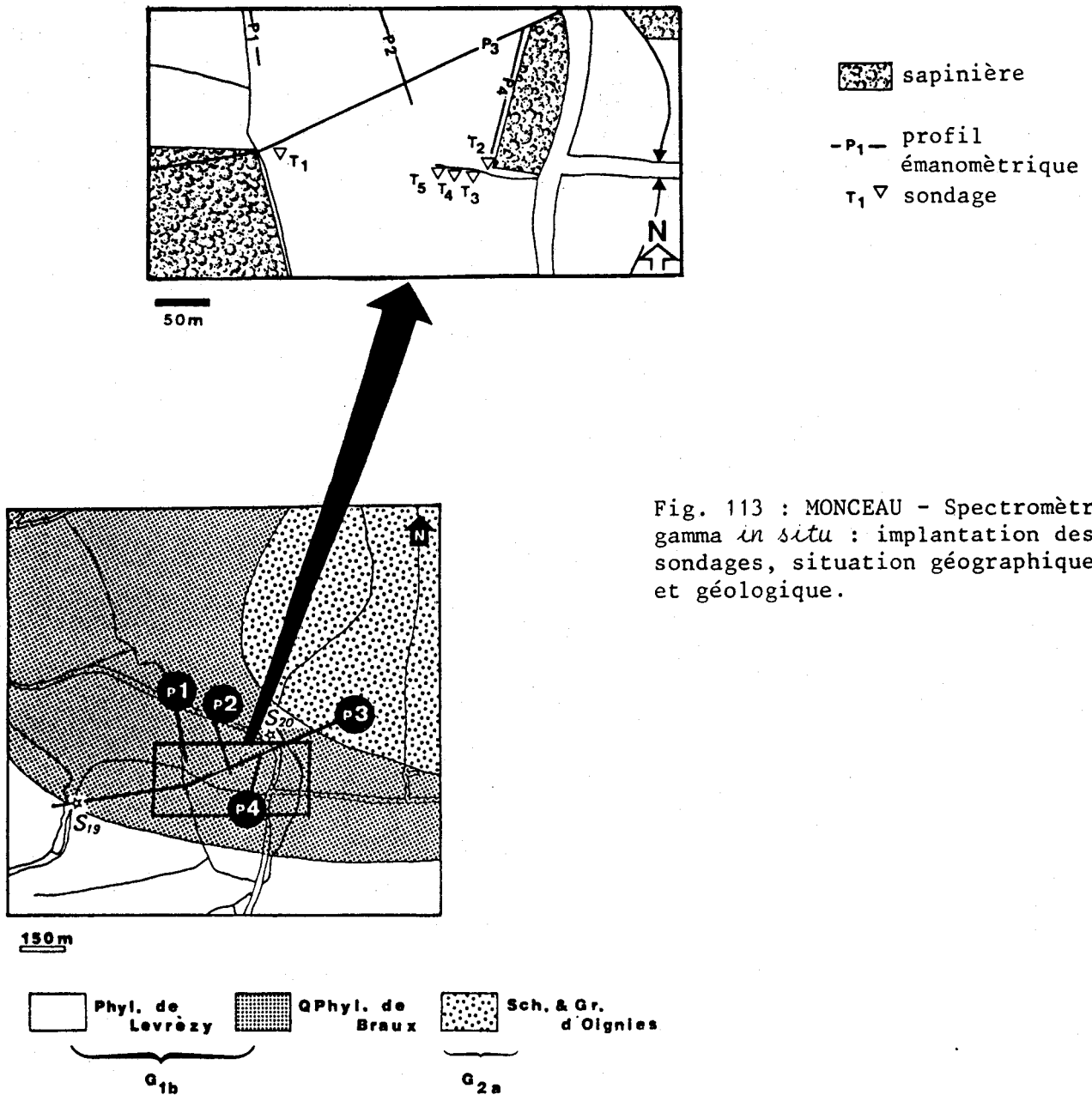


Fig. 113 : MONCEAU - Spectrométrie gamma *in situ* : implantation des sondages, situation géographique et géologique.

utilisé en routine au laboratoire pour les dosages du Radon à la F.P.Ms. Le détecteur (cristal de NaI) est adapté aux conditions de terrain (protection contre les chocs et l'humidité).

D'un point de vue pratique avant le travail sur le terrain, l'appareillage est étalonné sur les dalles de la station de calibration de la F.P.Ms (J.M. CHARLET *et al* , 1982). La période de comptage est de 800 secondes. En sondage, une mesure est faite tous les mètres.

Pour la conversion des résultats, j'ai utilisé les pics à :

- 2620 keV pour le Thorium (Tl 208)
- 1760 keV pour l'Uranium (Bi 214)
- 1560 keV pour le Potassium (K 40)

2.2.3. RESULTATS - INTERPRETATIONS

2.2.3.1. Implantation des sondages

Cinq sondages ont été réalisés. Afin de minimiser les risques d'éboulement pendant les mesures, les trous ont été tubés à l'aide de tuyaux de P.V.C.

- Le sondage T<sub>1</sub> a été implanté dans la zone du profil P<sub>3</sub> où les teneurs en Radon (émanométrie) commencent à augmenter (fig. 51, intersection des profils P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>). La tarière a percé 5 m de couverture (manteau d'altérites périglaciaires) avant de buter sur des éléments plus durs (bed rock ?).
- Le sondage T<sub>2</sub>, en bordure d'un chemin creux a atteint 4,80 m (soit 5 points de mesure).
- Les sondages T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> ont été effectués dans le chemin creux, à 1,50 m en contrebas de T<sub>2</sub>, ils ont atteint le bed rock à -1m (ce qui correspond à la cote -250m par rapport à T<sub>2</sub>).

Sondages	Cote m	U ppm	Th ppm	K <sub>2</sub> O %	Th/U	U/K <sub>2</sub> O
T <sub>1</sub>	.1	1.8	11.1	1.1	6.16	1.63
	.2	1.1	10.6	1.2	9.63	0.91
	.3	1.6	10.7	1.3	6.88	1.23
	.4	2.3	10.	1.3	4.34	1.76
T <sub>2</sub>	.1	2.7	10.2	0.9	3.77	3.
	.2	4.1	10.4	1.2	2.53	3.41
	.3	3.3	9.3	1.3	2.81	2.53
	.4	3.9	10.5	1.5	2.69	2.60
	.4.8	3.6	10.6	1.7	2.94	2.11
T <sub>3</sub>	.2.5	5.3	8.2	1.	1.54	5.3
T <sub>4</sub>	.2.5	4.1	8.8	1.1	2.14	3.72
T <sub>5</sub>	.2.5	2.9	11.8	1.6	4.06	1.81

Fig. 114 : MONCEAU : spectrométrie gamma *in situ* - résultats des mesures.

2.2.3.2. Résultats - Interprétation

Je présente les chiffres dans le tableau de la fig. 114. Les graphiques (fig. 115 A et B) donnent une représentation à l'évolution des teneurs en U, Th et K selon 2 verticales (en T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>) et selon la ligne T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>, le tout dans la couverture périglaciaire.

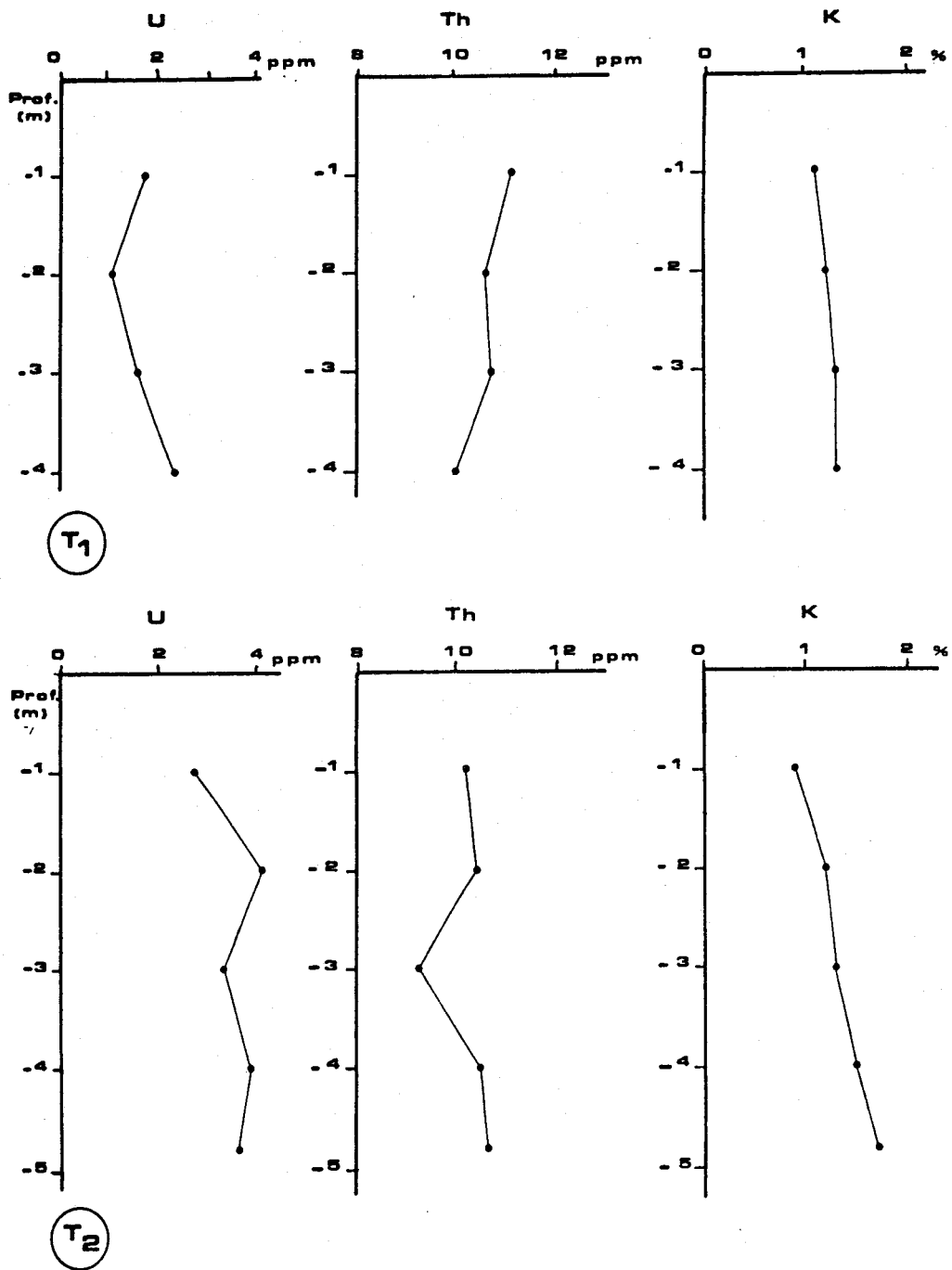


Fig. 115 : Evolution des teneurs en radioéléments selon deux verticales.

D'un point de vue général, les teneurs enregistrées sont normales. Les variations les plus fortes sont enregistrées pour l'Uranium : de 1,1ppm à 5,3 ppm. Du fait des variations Ouest-Est des concentrations en Radon, j'ai tracé le profil de la figure 116. La cote -2,50 m a été choisie car c'est à ce niveau que je possède le plus de données.

- Evolution selon les verticales  $T_1$  et  $T_2$  : Dans les deux cas, les teneurs sont normales. Les variations enregistrées ne sont pas significatives. Le seul point à noter est que les concentrations en eU pour  $T_2$  sont plus fortes que pour  $T_1$  (fig. 116).

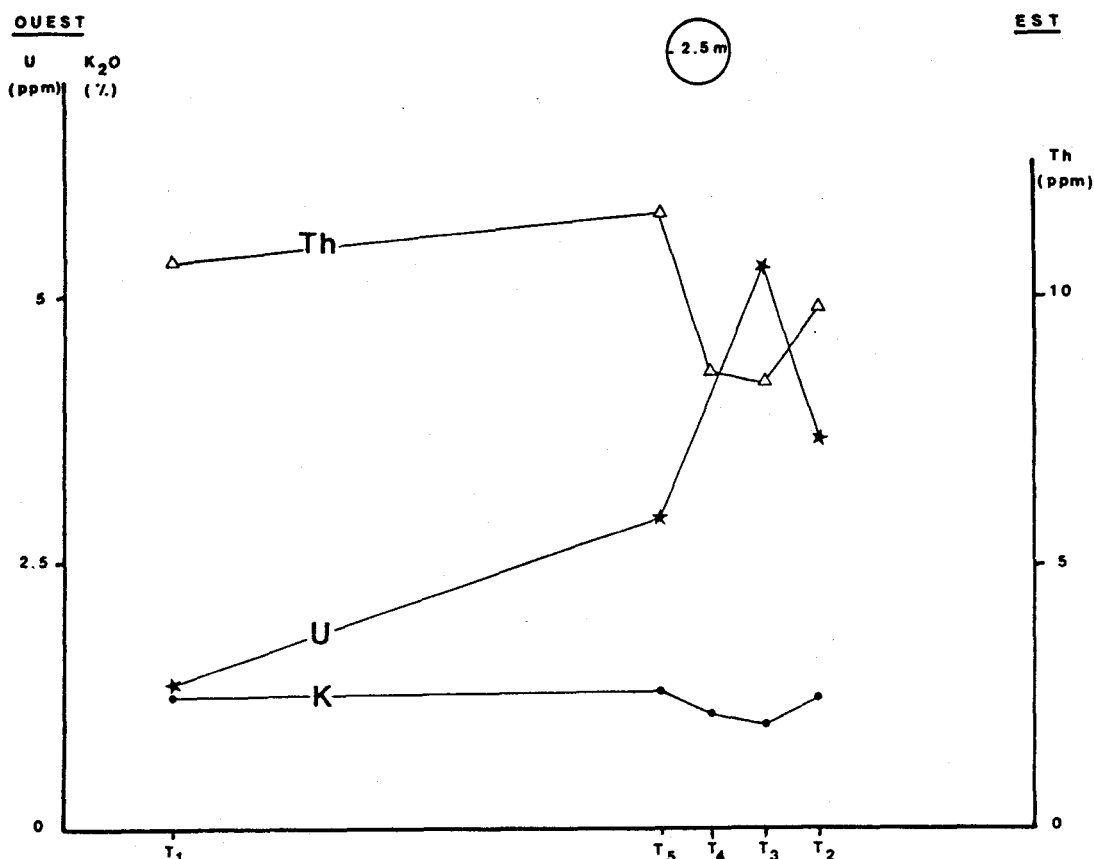


Fig. 116 : Evolution des teneurs en radioéléments selon la ligne T<sub>1</sub> - T<sub>2</sub> à la cote -2,5m .

- Evolution selon la ligne de profil T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> (fig. 116) à la cote -2,5m.

Les comportements du Th et de K<sub>2</sub>O sont parallèles, ce qui est assez classique (liaison Th-K<sub>2</sub>O). Par contre, le comportement de l'Uranium leur est antagoniste. Elle va dans le même sens que celle des concentrations en Radon mises en évidence par l'émanométrie. On constate une nette augmentation de la concentration en Uranium en se dirigeant vers l'Est.

#### 2.2.4. ANALYSES EN SPECTROMETRIE GAMMA DE LABORATOIRE

4 échantillons des sondages T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> ont été pris lors des sondages afin d'analyses en laboratoire. Je présente figure 117 le résultat des dosages.

Trois d'entre eux proviennent du sondage T<sub>1</sub> (PAS 1,2,3). On peut constater que les teneurs en radioéléments sont normales, qu'il n'y a pas d'évolution notable des concentrations avec la profondeur et que la

N°	COTE m	eU ppm	Th ppm	K <sub>2</sub> O %	Um ppm
<b>PAS 1</b>	.1	3,3	10,9	2,6	3,1
<b>2</b>	.3	2,6	11,7	2,6	2,8
<b>3</b>	.4	3	11,8	2,6	2,7
<b>4</b>	.4	4,4	11,7	2,7	4,1

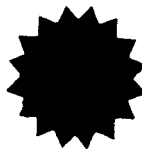
Fig. 117 : Analyse en spectrométrie gamma de laboratoire des échantillons prélevés à la tarière.

concordance avec les résultats de terrain est assez bonne (faible concentration). Le quatrième échantillon (PAS 4) a été prélevé en T<sub>2</sub> à -4m. Les teneurs en radioéléments sont normales et concordent assez bien avec les résultats de terrain (fig.114).

Si on considère l'évolution des concentrations en Uranium (les seules qui fluctuent) de T<sub>1</sub> à T<sub>2</sub>, il faut noter la convergence des résultats avec ceux qui ont été exposés en 2.2.3. La teneur en Uranium semble être plus forte à l'Est de la ligne T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> (à -4m, on passe de 3 ppm à 4,4ppm d'eU).

#### 2.2.5. CONCLUSIONS

Les analyses en spectrométrie gamma de terrain semblent confirmer les résultats de l'émanométrie, à savoir : la polarité Est de l'anomalie Radon et des concentrations en Uranium. Il serait bon, afin de dissiper les doutes liés à la modification de l'implantation des sondages, de réaliser une telle étude sur le site initialement visé.





CHAPITRE III

SPECTROMETRIE ALPHA





## CHAPITRE III.- ETUDE EN SPECTROMETRIE ALPHA

### 3.1. INTRODUCTION

L'étude en spectrométrie gamma des remplissages de fracture et de certaines roches a fait apparaître un net déséquilibre. Il était donc tentant de réaliser quelques analyses en spectrométrie alpha. En effet, l'étude du rayonnement alpha des radioéléments naturels permet d'identifier et de doser les radioisotopes du Thorium et de l'Uranium. En faisant les divers rapports isotopiques, on peut quantifier et interpréter les déséquilibres et dans certaines conditions avancer un âge. Grâce à R. CANTILLANA et Y. QUINIF qui développent actuellement une chaîne d'analyse de ce type, deux échantillons \* ont été étudiés afin d'aborder dans un premier temps la compréhension du déséquilibre.

### 3.2. GENERALITES SUR LA METHODE (D'APRES R. CANTILLANA, 1985)

Je tiens, tout d'abord, à remercier particulièrement Raphael CANTILLANA qui a réalisé la préparation des échantillons, qui m'a aidé dans la compréhension des diagrammes obtenus et qui a participé à la rédaction de ce paragraphe.

#### 3.2.1. INTRODUCTION

L'activité des isotopes de la famille de l' $^{238}\text{U}$  a été mesurée par spectrométrie alpha. En effet, les isotopes  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  et  $^{230}\text{U}$  sont des émetteurs de particules alpha. La connaissance des rapports d'activité entre ces isotopes peut permettre d'avancer des conclusions ou hypothèses intéressantes.

Lorsqu'un isotope radioactif émet une particule alpha, il se transforme en un autre élément d'un poids atomique inférieur de quatre unités et un nombre atomique inférieur de deux unités. La particule alpha émise correspond au noyau d'un atome de Hélium, d'où une masse très importante par rapport à d'autres particules radioactives. Ceci exige des précautions particulières lors du comptage de l'activité, nous y reviendrons plus loin.

Profitant de l'expérience que possède le Laboratoire du groupe G.E.P. du Professeur J.M. CHARLET à la F.P.Ms, dans la détermination des activités

---

\* D'autres analyses sont en cours. Elles feront l'objet dans l'avenir d'une étude beaucoup plus complète sur les phénomènes de migration de l'Uranium dans le Dévonien inférieur.

des isotopes émetteurs alpha dans un tout autre domaine d'application, à savoir la datation des concrétions calcaires par la méthode U/Th, nous avons pu effectuer nos mesures.

### 3.2.3. PROCEDURE CHIMIQUE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS

Cette procédure a été adaptée aux échantillons étudiés. On peut distinguer, en gros, les étapes suivantes :

- détermination de la concentration en U, ce qui conditionne la quantité de traceur radioactif, à activité connue, à ajouter;
- dissolution de l'échantillon par  $\text{HNO}_3$  à chaud;
- addition du traceur  $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$ ; la quantité dépend du poids de l'échantillon et de sa teneur en Uranium;
- filtration : le filtrat (jaune) contient une grande quantité de fer;
- précipitation du fer sous forme d'hydroxyde par élévation du pH à l'ammoniaque, le Th et l'U contenus dans la solution copécipitent avec l'hydroxyde de fer;
- filtration, élimination du filtrat;
- dissolution de l'hydroxyde par  $\text{HCl}$ , le Th se retrouve à l'état de cations, en solution; l'U à l'état d'anions oxydés;
- Résine échangeuse anionique : elle permet de séparer l'U du Th, elle laisse passer le Th et absorbe l'U par échange avec des anions  $\text{Cl}^-$ ;
- élution de l'U : l'U absorbé par la résine est élué avec de l' $\text{HCl}$  dilué;
- viennent ensuite des traitements séparés mais similaires pour les solutions contenant de l'U et du Th;
- nouvelle copécipitation, dissolution, évaporation et reprise par 2 ml d' $\text{HNO}_3$  dilué.
- extraction liquide-liquide : à chaque solution aqueuse (acide) contenant respectivement l'U et le Th est ajouté un volume équivalent d'une solution organique de TTA dans du benzène;
- agitation, centrifugation, l'U et le Th dans chaque solution passent dans la phase organique sous forme de complexes;
- évaporation : la solution organique ( $\pm$  3 ml) est évaporée sur une lame en acier inoxydable (poli-miroir);
- calcination : la lame est calcinée pour éliminer les constituants organiques et former ainsi un mince dépôt d'U ou de Th sous forme d'oxydes;

- comptage : les lames d'acier sont devenues des émetteurs alpha, leur activité est déterminée dans un spectromètre alpha.

### 3.2.3. SPECTROMETRIE ALPHA

Il est constitué d'un détecteur dit à barrière de surface. En face de celui-ci est placé l'émetteur alpha étudié. Le tout est placé dans une chambre sous vide (inférieur à 0,1 mm de Hg). Le spectromètre est relié à un analyseur à multicanaux.

### 3.2.4. DETERMINATION DE L'ACTIVITE

Chaque émetteur alpha émet son rayonnement à une énergie bien déterminée. Pour les isotopes qui nous intéressent  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$  et les traceurs  $^{232}\text{U}$  et  $^{228}\text{Th}$ , les énergies d'émission sont comprises entre 4 et 6 MeV. Ainsi en travaillant dans cette gamme d'énergie, on peut observer l'apparition des pics correspondant à chacun de ces isotopes.

Du fait du trop grand rapprochement entre les énergies d'émission du  $^{230}\text{Th}$  et du  $^{234}\text{U}$ , il est nécessaire d'appliquer aux échantillons un traitement chimique aussi poussé que celui décrit précédemment.

Finalement, par intégration des pics obtenus après des temps de comptage de l'ordre de 50 heures (selon la concentration en radioéléments, ce temps fluctue) l'activité de chaque isotope est déterminée.

## 3.3. LES RESULTATS

### 3.3.1. INTRODUCTION

Ils sont synthétisés par les figures 118, 119, 120. J'ai choisi d'analyser un remplissage et une éponte de fracture. Il est, en effet, intéressant de considérer les échanges roche-remplissage. L'échantillon P.A. 024 correspond à l'éponte de la fracture 24-26; le point de prélèvement 24 est situé 1 m au dessus (environ) du point 26. L'échantillon P.A.F. est le remplissage de la fracture au point 26.

### 3.3.2. ANALYSE DE P.A.O.024

Sur cet échantillon, quelques problèmes de résolution sur le spectre de l'Uranium sont dus à la persistance de traces de fer en fin de préparation. Le spectre de l'Uranium révèle la présence de trois isotopes de l'Uranium :  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$  (fig. 118 A). Le dosage de l'U donne 18ppm pour 20.9 dosés en spectrométrie gamma. Le rapport isotopique  $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$  est proche de 1 (fig. 120) traduisant l'équilibre de la famille de l'Uranium dans cette éponte.



PAO 024

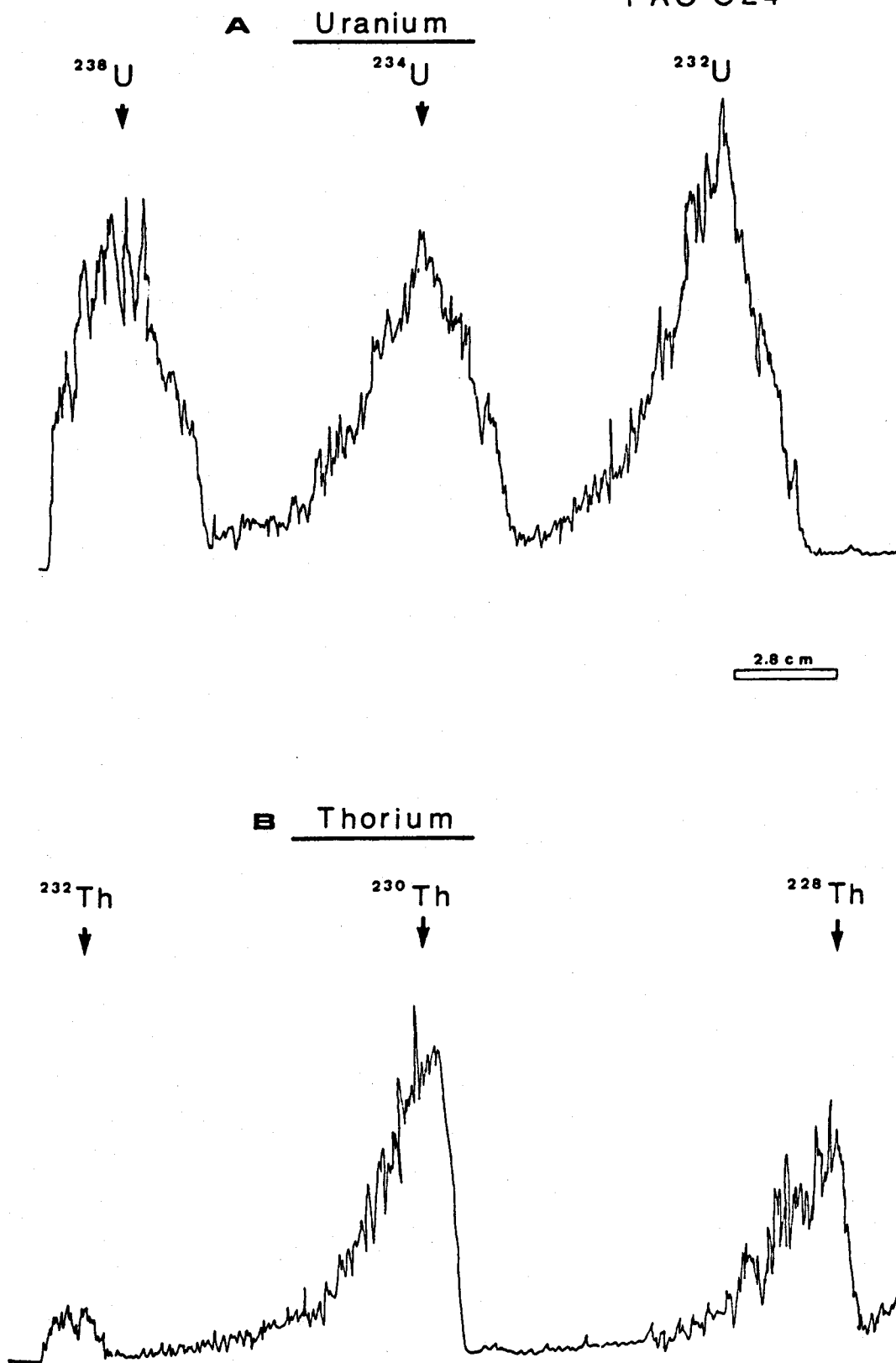


Fig. 118 : Spectrométrie Alpha P.A.O. 024 : A. spectre de l'Uranium  
B. spectre du Thorium.

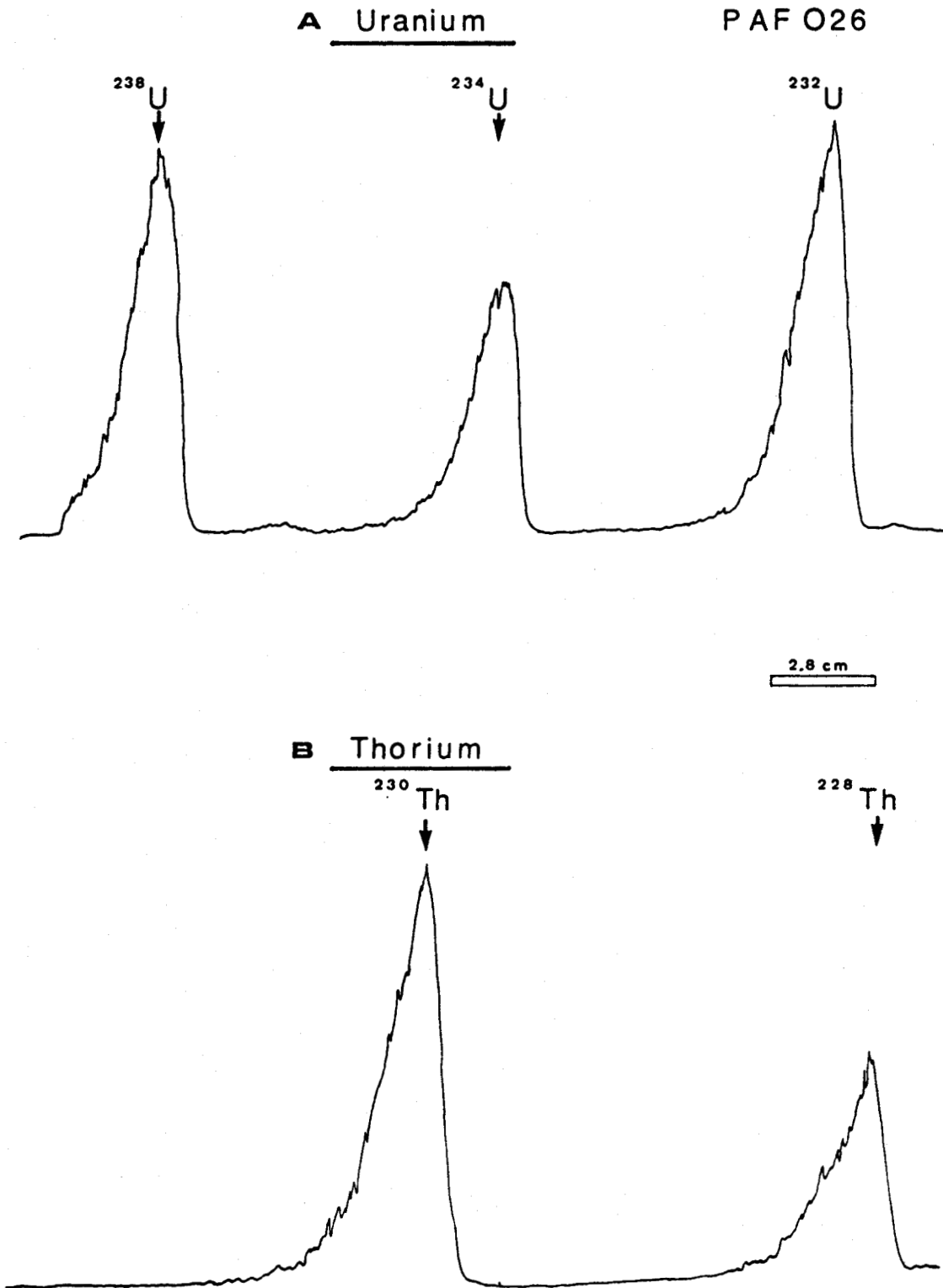


Fig. 119 : Spectrométrie Alpha, P.A.F. O26 : A. spectre de l'Uranium  
B. spectre du Thorium.



Le spectre du Thorium révèle l'existence de trois isotopes du Thorium:  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$  (fig. 118B). Le dosage du Thorium donne 7,8 ppm pour 11.4 dosés en spectrométrie gamma. Le rapport isotopique  $\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}$  est de 11.7, il traduit la concentration en  $^{230}\text{Th}$  nettement supérieure à celle en  $^{232}\text{Th}$ . Ce dernier est attribuable à la fraction détritique du sédiment qui compose ce grès.

Si on considère le rapport  $\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}$ , sa valeur (1,66) est telle qu'il ne peut pas traduire un lessivage de la roche en période subactuelle. En effet, dans ces conditions, l' $^{234}\text{U}$  quitte rapidement son site, ce qui donnerait au rapport une valeur plus importante. On peut déduire de ceci que rien de tel ne se produit depuis plus de 300.000 ans à ce niveau. L'absence de lessivage est d'ailleurs traduite par l'équilibre existant entre  $^{234}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ .

### 3.3.3. ANALYSE DE P.A.F. 026

Je présente les spectres obtenus; en figure 119. Le spectre de l'Uranium révèle la présence de trois isotopes de l'Uranium dans les remplissages  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$  (fig. 119 A). Le dosage de l'U donne 388 ppm pour 366 dosés en spectrométrie Gamma. Le rapport isotopique  $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$  montre un net déséquilibre entre les deux Uranium. Il existe un déficit en  $^{234}\text{U}$ . On peut donc imaginer une migration de l' $^{234}\text{U}$  dans le réseau de fracture alors que l' $^{238}\text{U}$  moins facilement mobilisable resté en place plus longtemps dans la structure cristalline des minéraux du fer.

N° Ech.	Spectrométrie ALPHA					Spectrométrie GAMMA		
	U ppm	Th ppm	$\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}$	$^{238}\text{U}$ ppm	$^{232}\text{Th}$ ppm	$\text{K}_2\text{O}$ %
PAO 024	18	7,8	1,02	11,7	1,66	20,9	11,4	2,79
PAF 026	388	0	0,71	-	2,98	366	18,2	0,4

Fig. 120 : Résultats des analyses en spectrométries Alpha et Gamma (échantillons P.A.O. 024 et P.A.F. 026).

Le spectre du Thorium ne nous indique la présence que de deux isotopes de ce radioélément le  $^{230}\text{Th}$  et le  $^{228}\text{Th}$ .

La valeur du rapport  $\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}$  va dans le sens des réflexions faites précédemment : le départ d' $^{234}\text{U}$  crée un déficit qui donne une forte valeur à ce rapport.

#### 3.3.4. CONCLUSIONS

L'interprétation présentée ne s'appuie que sur un nombre restreint d'analyses.

Il semble cependant que les comportements des radioéléments ne soient pas les mêmes dans les remplissages et dans les épontes de fracture. Dans les remplissages le système est encore en train d'évoluer : les conditions de lessivage subactuelles semblent capables d'entraîner l'Uranium vers les parties profondes. Les épontes montrent un système figé (depuis au moins 300.000 ans) dans lequel l'Uranium est en équilibre, sans apport ni départ de matière.





CHAPITRE IV

ETUDES PETROGRAPHIQUES







## CHAPITRE IV.- ETUDES PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

### 4.1. LES PHYLLADES DE LEVREZY ET LES QUARTZOPHYLLADES DE BRAUX

On a vu en 2ème partie que ces formations sont, pour ce qui nous intéresse, formées de trois types de roches :

- des grès,
- des quartzophyllades,
- des phyllades.

Les caractères généraux de ces roches sont connus, je n'en ferai donc qu'une présentation rapide ne m'attachant qu'aux points qui ont eu une importance dans le déroulement de mon travail.

#### 4.1.1. ETUDES AU MICROSCOPE OPTIQUE

##### 4.1.1.1. Les phyllades

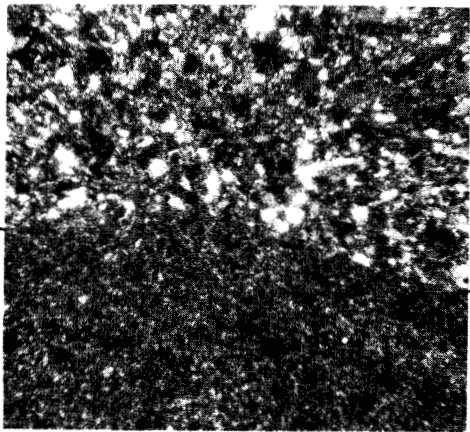
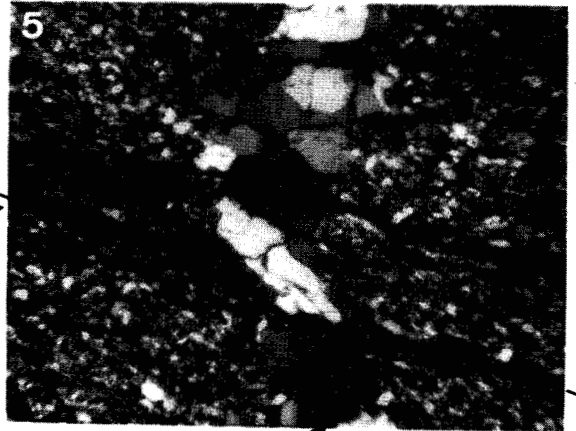
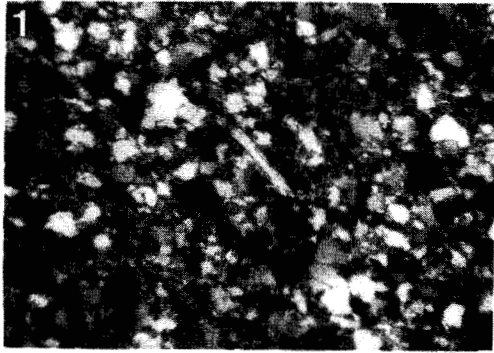
D'une façon générale, les phyllades rencontrées appartiennent à la formation de Levrézy. Ce sont des roches schisto-gréseuses dont le débit est grossier. L'étude optique en est rendue complexe par la finesse des éléments. Cependant, on y distingue des grains de quartz, quelques feldspaths, noyés dans une importante matrice phylliteuse. En éléments accessoires on rencontre quelques grains de matière organique assez isolés dans ces roches. Le métamorphisme ardennais ayant atteint ces faciès, les argiles sont fréquemment chloritisées (pléochroïsme dans les verts).

La schistosité ( $S_1$ ) a fréquemment joué un rôle lors de la propagation de l'altération dans la roche saine. Il est fréquent, dans les phyllades et les quartzophyllades, de voir  $S_1$  soulignée d'oxydes de fer qui semblent avoir imprégné la roche à partir de microfractures. Celles-ci sont soit remplies de ces oxydes, soit colmatées par du quartz.

##### 4.1.1.2. Les quartzophyllades

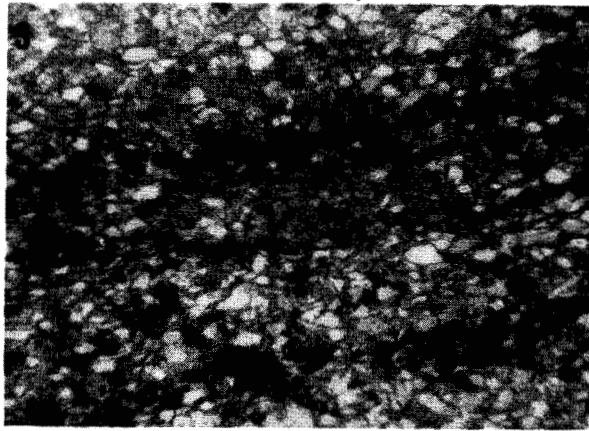
On en rencontre dans les deux formations. Ces roches dont le caractère quartzitique est net sont le plus souvent composées d'une alternance de lits pélitiques et de lits gréseux (planche photo IV, photo 2). Leur composition minéralogique de base est simple (les photos 2, 5, 6, 7 de la planche IV sont réalisées sur des lames minces taillées dans ce type de roche) : du quartz, des argiles (dont des chlorites), quelques feldspaths

PLANCHE IV



Limonite

Microfracture



MOD

S<sub>1</sub>

Limonite



MOD

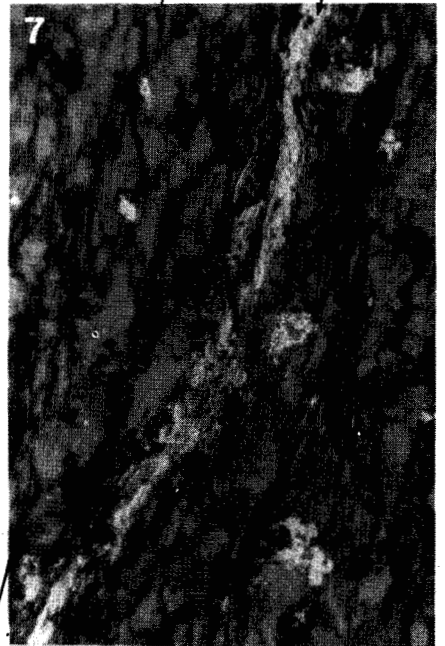




PLANCHE PHOTO IV  
LEGENDE

PHOTO. 1 : P.A.O. 016 : Grès à ciment quartzitique, à matière organique dispersée (X 35).

PHOTO. 2 : P.A.O.006 : Quartzophyllade, limite entre 2 microlits (X 125).

PHOTO. 3 : R.O.B. 018 : Grès argileux à microlits de matière organique soulignant les stratifications entrecroisées (X 35).

PHOTO. 4 : P.A.O. 001 : Grès argileux à stratification entrecroisée, matière organique vue au microscope à réflexion (noter la petitesse et la mauvaise conservation des particules) (X 125).

PHOTO. 5 (X 35) et PHOTO. 6 (X 100) : P.A.O. 007 : Relation entre  $S_1$ , la microfracturation et les oxydes de fer disposés selon  $S_1$ .

PHOTO. 7 : P.A.O. 026 : Veinule de limonite disposée selon  $S_1$  (vue au microscope à réflexion, X 125).

(albite ?), des particules de matière organique, des oxydes de fer (dans les faciès les plus altérés). Les photos 5, 6, 7 de la planche IV illustrent les relations entre l'imprégnation ferrugineuse liée à l'altération et la schistosité.

#### 4.1.1.3. Les grès

Expression extrême de la tendance quartzitique de ces roches, on en rencontre quelques uns dans les phyllades de Levrézy mais ils sont surtout présents dans les quartzophyllades de Braux. Selon la nature de leur ciment, ils peuvent être plus ou moins argileux. Ils ne sont que rarement à l'état de quartzite. La composition minéralogique est essentiellement quartzreuse, les argiles (chlorites) sont cependant présentes, on observe des feldspaths. Dans les lames, on rencontre : de l'hématite, des hydroxydes de fer, de la matière organique. Cette dernière peut être dispersée dans les grès de façon aléatoire (planche photo IV, Photo 1) ou alors souligner des stratifications entrecroisées (photos 3 et 4).

Les microfractures sont dans ces roches fréquentes, cimentées par du quartz ou des oxydes de fer. Ceux-ci imprègnent d'autant mieux les grès que le ciment en est argileux.

#### 4.1.2. ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE DISPERSEE (M.O.D.)

##### 4.1.2.1. Introduction

J'ai présenté en première partie quelques aspects des liaisons M.O.-Uranium. Dans le paragraphe 4.1 de ce présent chapitre, j'ai décrit les faciès rencontrés sur le terrain. Il est donc aisé de comprendre qu'il était tentant d'étudier la M.O.D. afin de savoir si elle présente une quelconque affinité avec l'Uranium présent. J'ai abordé l'étude de deux façons : par la voie optique à partir de surfaces polies taillées dans des échantillons, j'ai tenté de mesurer le pouvoir réflecteur des particules de M.O.D. observées, par séparation en flottation afin de concentrer le matériel et d'en mesurer la radioactivité.

##### 4.1.2.2. Résultats

###### a) Mesures optiques

Cette tentative ne fut guère fructueuse. En effet, le nombre de mesures réalisables par échantillon est faible et peu utilisable sur le plan statistique. De plus, on a vu en 4-1 que les particules sont petites, mal conservées et fortement évoluées. Ce dernier point se traduit notamment par une homogénéisation du pouvoir réflecteur de la matière organique. Un des moteurs

de ce phénomène a été le métamorphisme ardennais. Tout ceci fait que j'é n'ai pas approfondi cette étude. Cependant, j'ai conservé à l'esprit l'existence au sein des roches du Gedinnien inférieur de ces particules de M.O.D. qui constituent autant de microfaciès réducteurs susceptibles de fixer l'Uranium.

#### b) La séparation de la M.O.D. par flottation

Il est possible d'appliquer au laboratoire les techniques de flottation industrielle (P. BLANQUART, 1974). La finalité de cette technique est de séparer les particules organiques de leur matrice rocheuse. Le principe de base en est le suivant : les particules de M.O. en présence d'un solvant spécifique mélangé à un réactif collecteur sont adsorbées à la surface de bulles d'air, l'accrochage est indépendant de la densité des grains.

Ainsi que l'indique P. BLANQUART, j'ai travaillé sur une fraction granulométrique comprise entre 100 et 500 microns. Dans cette gamme de granulométrie, la concentration d'échantillons à réaliser est de 200 g par litre d'eau. Les réactifs utilisés sont :

- du fuel oil (A) pour le collecteur,
- du M.I.B.C. (méthylino-butylcarbinol) (B) pour le solvant.

Dans les faits, la qualité de la séparation est empirique. On procède par tâtonnements. Personnellement, dans la série d'échantillons choisie, j'ai obtenue les meilleurs résultats avec un mélange de 6 gouttes de A pour 6 gouttes de B additionnées à 400 cm<sup>3</sup> (pour 100 à 150 g de matériel). J'ai travaillé dans ces conditions pour l'ensemble des échantillons.

De plus, le temps de séparation a été constant pour tout le matériel, ce qui m'a permis, connaissant le poids initial de matière, le poids final et le poids de M.O.D. obtenu, d'établir un pourcentage empirique de la M.O.D. présente dans chaque échantillon (fig.121). Ces pourcentages, quoique faibles, présentent des variations importantes (0,81 % à 8,21 %).

#### 4.1.2.3. Relation M.O.D. - Uranium métal

Les particules de M.O.D. constituent au sein de leur matrice des micro-milieus réducteurs susceptibles de fixer l'Uranium. Donc, que ce soit syngénétiquement ou épigénétiquement, un fluide chargé en Uranium peut amener la fixation de tout ou partie de ce dernier sur de telles particules.

J'ai donc établi la relation des figures 122 A et B. Si l'ensemble des échantillons (A) est considéré, la relation est mauvaise. Il semble cependant se dégager une ou plusieurs tendances dans la façon dont se placent les échantillons. J'ai donc sélectionné ceux-ci en procédant par étapes.

N° ORDINAT.	N° TERRAIN	% M.O.D.
PAO 001	01	2.79
002	2	3.21
003	3	1.65
004	4	4.75
005	5	3.26
006	6	3.56
007	7	4.64
008	8	4.05
014	14	2.55
016	16	4.35
024	24	2.93
025	25	3.41
026	26	3.20
029	29 s	3.75
030	30	2.24
033	33	2.98
038	38	4.94
043	29 n	1.64
046	ROB 1	2.15
047	2	3.09
048	3	2.61
052	15	5.53
053	18	1.82
054	19	1.78
056	21	8.21
058	23	3.17
061	34	0.87
064	43 <sub>2</sub>	2.59
065	43 <sub>1</sub>	7.92
066	44	2.07
067	45	1.32

Fig. 121 : Proportions de M.O.D. présente dans les échantillons ayant subi une séparation en flottation.

Le coefficient de corrélation ( $R = 0,336$ ) de la relation  $U_m = f(M.O.D.)$ , la répartition des points autour de la droite de corrélation confirme (ensemble I de la figure 122B) l'existence de plusieurs comportements de l'Uranium vis à vis de la M.O.D. étudiée. De l'ensemble de points I, je tire deux sous-ensembles II et III (fig. 122 et 123) pour lesquels j'obtiens deux relations dont les coefficients R sont significatifs. Les résultats obtenus confirment donc que dans les roches à M.O.D. étudiées, il existe une tendance à la fixation de l'Uranium par ces micro-milieus réducteurs que sont les grains organiques. Il semble de plus qu'il y ait deux dynamiques dans cette fixation. Il se peut donc que l'Uranium puisse se fixer

soit en grande partie sur la M.O.D., soit à la fois sur la M.O.D. et sur un autre type de piège.

Par ailleurs, dans ces comportements, le rang de carbonification atteint par la M.O.D. n'est pas à exclure de l'interprétation. En effet, les liaisons matière organique-Uranium décrites par Martin CALVO (1974), DISNAR et TRICHET (1983), NAKASHIMA, DISNAR et PERRUCHOT (1983), le sont pour de la Matière Organique peu évoluée du type du lignite ou de substances bitumineuses.

Les résultats de ce travail seront intégrés d'une part en troisième partie, chapitre V où je présente les mesures de radioactivité faites sur certaines de ces particules organiques, d'autre part dans l'analyse multivariante (3ème partie, Chapitre VII).

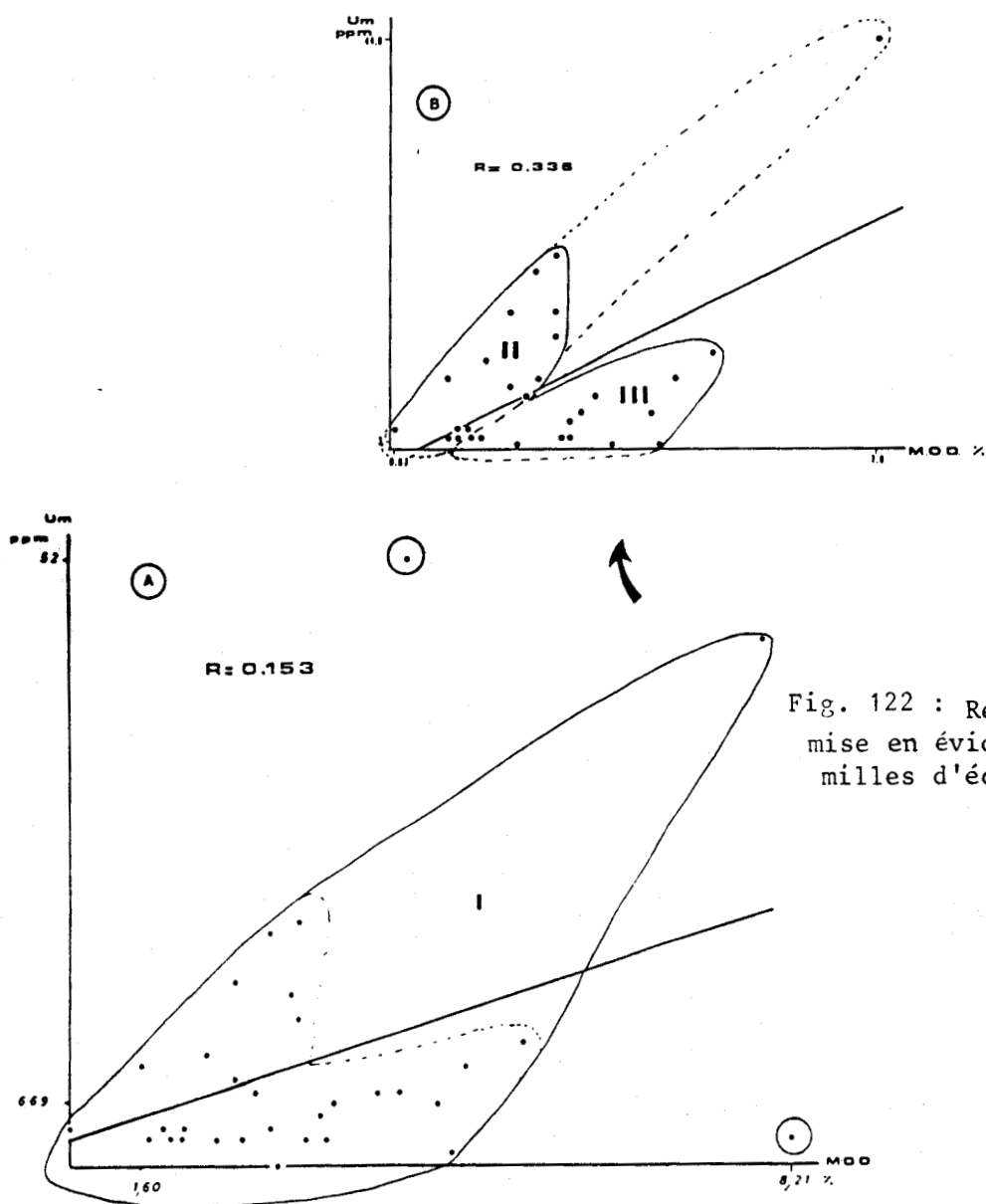


Fig. 122 : Relation Um-MOD mise en évidence des 2 familles d'échantillons.

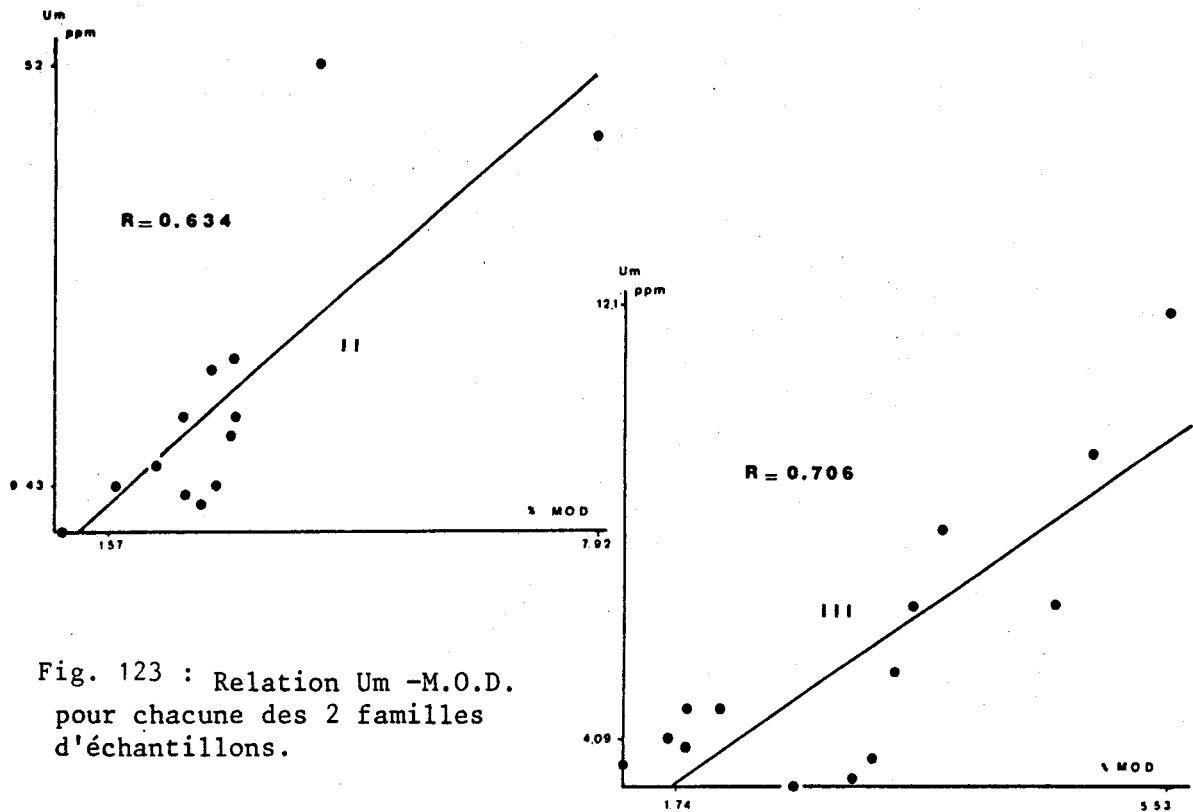


Fig. 123 : Relation Um -M.O.D. pour chacune des 2 familles d'échantillons.

#### 4.1.3. ETUDE EN DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X

##### 4.1.3.1. Introduction

J'ai choisi de faire porter la totalité de l'analyse en diffractométrie des Rayons X sur les 36 échantillons de la coupe réalisée dans la carrière d'Oizy.

L'étude optique des différents faciès montre l'importante contribution des minéraux argileux, ceci tant dans les grès que dans les phyllades et quartzophyllades.

##### 4.1.3.2. Les résultats

L'analyse sur roche totale de quelques échantillons afin d'en déterminer la minéralogie ne varie, par rapport à l'étude optique que par la détermination des minéraux argileux: illite et chlorite. Par la suite, l'étude a été menée sur la fraction inférieure à 2 micromètres. Les diagrammes ont été réalisés à partir de pâtes orientées (T.HOLTZAPFEL, 1981).

J'ai ainsi pu étudier les variations des teneurs en illite et chlorite au sein du matériel argileux (fig.124, 125) et tenter de les mettre en relation avec les teneurs en radioéléments.

La détermination des proportions de minéraux argileux se fait à partir de : - la hauteur du pic de l'illite (001) (A);  
- la demi-somme des hauteurs des pics (001) et (002) de la chlorite (B), le tout sur une pâte orientée et glycolée. Les valeurs sont converties en pourcentage (A + B = 100 %) (fig.125).

Les analyses ont donc porté sur 36 échantillons. Les minéraux mis en

N° ORDINAT.	N° TERRAIN	ILLITE	CHLORITE	l/c
PAO 001	O 1	40	60	1.10
002	2	40	60	1.15
003	3	55	45	1.28
004	4	30	70	1.25
005	5	55	45	1.22
006	6	40	60	0.66
007	7	70	30	3.47
008	8	40	60	1.20
009	9	55	45	1.25
010	10	50	50	1.10
011	11	70	30	2.85
012	12	50	50	1.10
013	13	75	25	3.34
014	14	60	40	1.75
015	15	70	30	2.04
016	16	30	70	1.25
017	17	55	45	2.25
018	18	55	45	2.06
020	20	30	70	1.25
021	21	35	65	1.28
022	22	70	30	2.92
023	23	40	60	1.20
024	24 <sub>r</sub>	60	40	1.70
025	25 <sub>r</sub>	55	45	1.30
026	26 <sub>r</sub>	70	30	2.85
027	27 <sub>r</sub>	55	45	2.06
028	28 <sub>rs</sub>	65	35	2.10
029	29 <sub>rs</sub>	65	35	1.80
030	30 <sub>r</sub>	60	40	1.75
031	31 <sub>r</sub>	55	45	2.30
032	32 <sub>r</sub>	50	50	1.15
033	33	70	30	3.50
035	35	55	45	1.32
038	38 <sub>r</sub>	45	55	1.01
042	28 <sub>rn</sub>	65	35	2.10
043	29 <sub>rn</sub>	65	35	1.80

Fig. 124 . Analyse en diffractométrie des rayons "X", tableau des résultats.

évidence sont bien cristallisés (fig. 125). Les largeurs à mi-hauteur du pic à 001 de l'illite ont été mesurées. Elles sont de l'ordre de 2 nm. Si on se reporte aux travaux de DUNOYER DE SEGONZAC (1969), les illites ainsi cristallisées appartiennent au domaine métamorphique et plus précisément à l'épizone. Les minéraux concernés sont donc susceptibles d'avoir été modifiés, recristallisés et ne porteraient plus (ou moins) l'empreinte de leurs origines sédimentologiques.



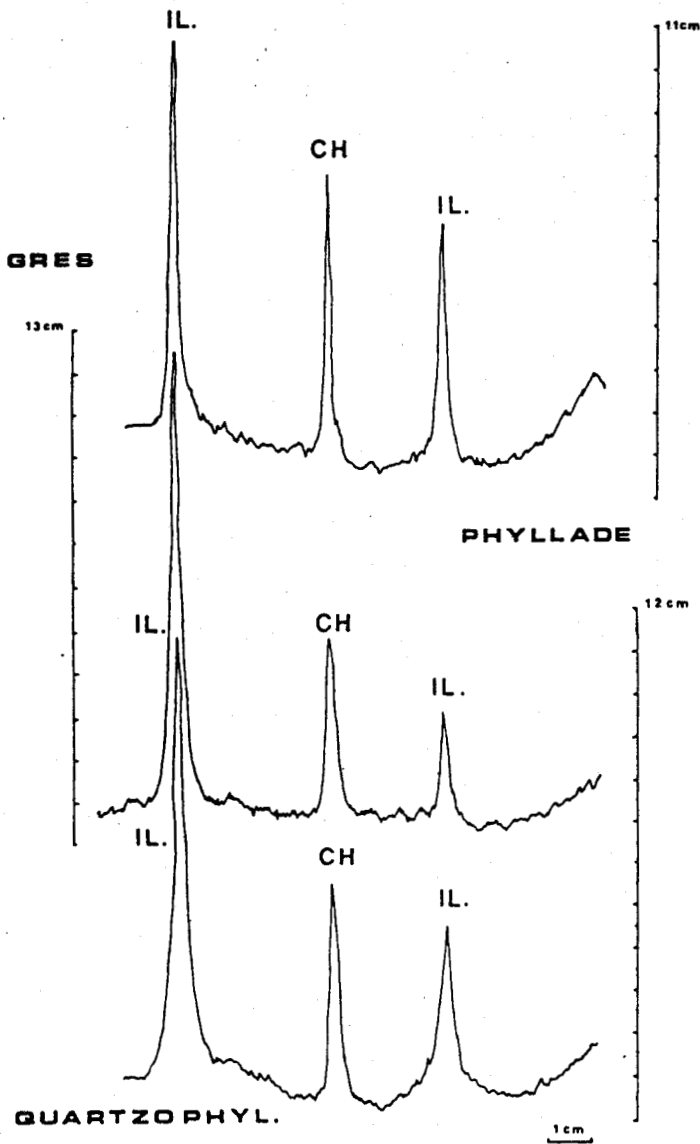
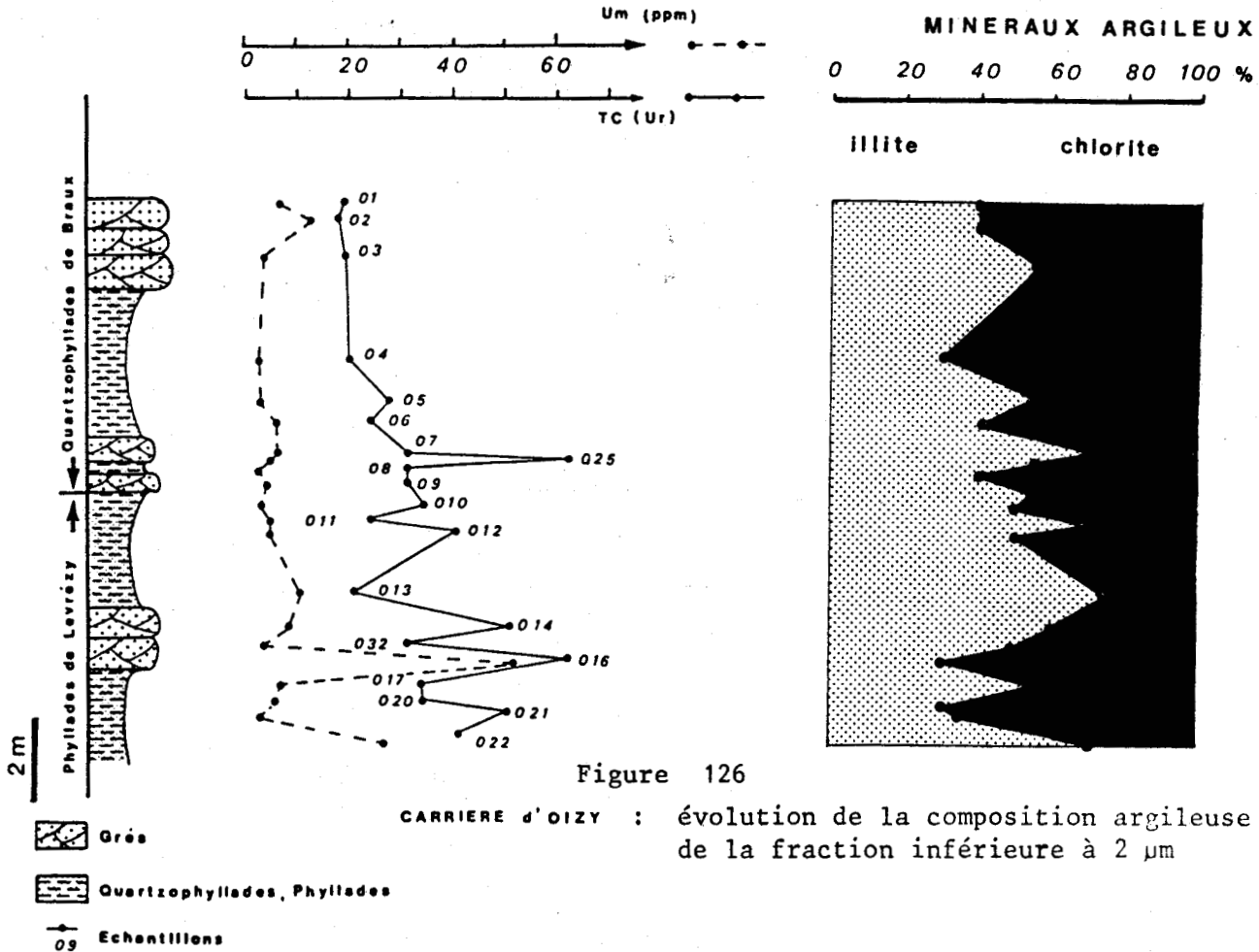


Fig. 125 : Exemples de diffractogrammes pour les 3 faciès étudiés.

#### 4.1.3.3. Les relations argiles-radioéléments

En présence des données de la minéralogie des argiles, j'ai tout d'abord réalisé le diagramme de la figure 126. La comparaison entre les fluctuations des teneurs en Uranium et la composition argileuse ne montre pas de liaison directe entre les deux éléments. Malgré tout, j'ai établi la relation  $U_m = f(\text{Illite})$  (fig.127A et B). En (A) aucune relation linéaire n'est discernable. Cependant, un échantillon (PAO 016) est apparemment très différent de l'ensemble des autres échantillons. On peut dire que pour celui-là, au moins, l'Uranium n'est pas lié à l'Illite. Si on considère la relation  $U_m = f(\text{Illite})$  pour l'ensemble des autres échantillons (fig.127B), il semble que deux groupes sont à prendre en compte. J'ai donc sélectionné ces deux groupes (fig.128) afin d'étudier la relation pour chacun d'entre eux. Pour le groupe I, le coefficient de corrélation (0,875) est bon montrant ainsi que l'Uranium est là fortement lié à l'Illite. Pour le groupe II, la valeur médiocre du coefficient de corrélation ( $R = 0,53$ ) montre que l'Ura-

nium est là moins lié à l'Illite et qu'un autre phénomène entre en jeu. Le passé métamorphique de ces terrains incite à la prudence pour l'interprétation de ces relations. Je reprendrais ce problème au niveau de l'analyse multivariable.



#### 4.2. LES REMPLISSAGES LIMONITIKES DE FRACTURES

##### 4.2.1. GRANULOMETRIE

En présence d'un sédiment meuble, j'ai cherché à connaître la répartition des diverses classes granulométriques composant ce matériel. Une nouvelle fois, j'ai été confronté aux problèmes liés aux difficultés d'échantillonnage. Je n'ai pu réaliser qu'un nombre restreint de granulométrie (fig.129).

Les points communs à tous les histogrammes présentés sont :

- la forte contribution des particules grossières (de l'ordre de 30 %),

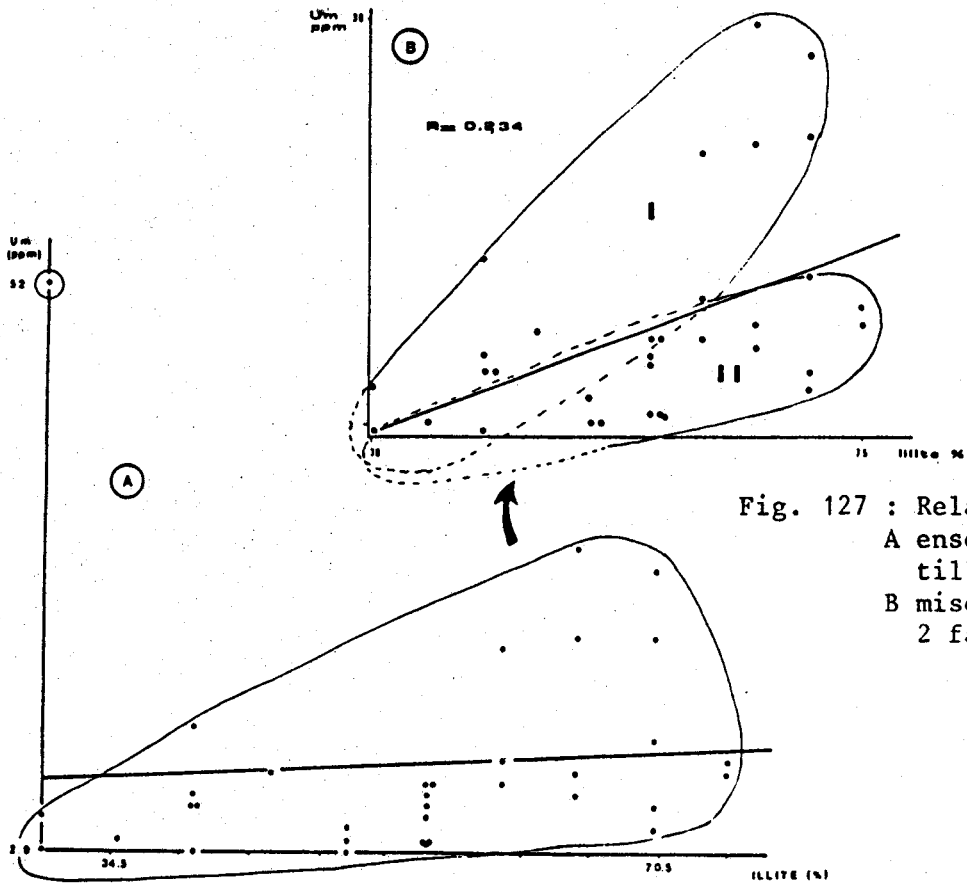


Fig. 127 : Relation Um -Illite  
A ensemble des échantillons  
B mise en évidence de 2 familles.

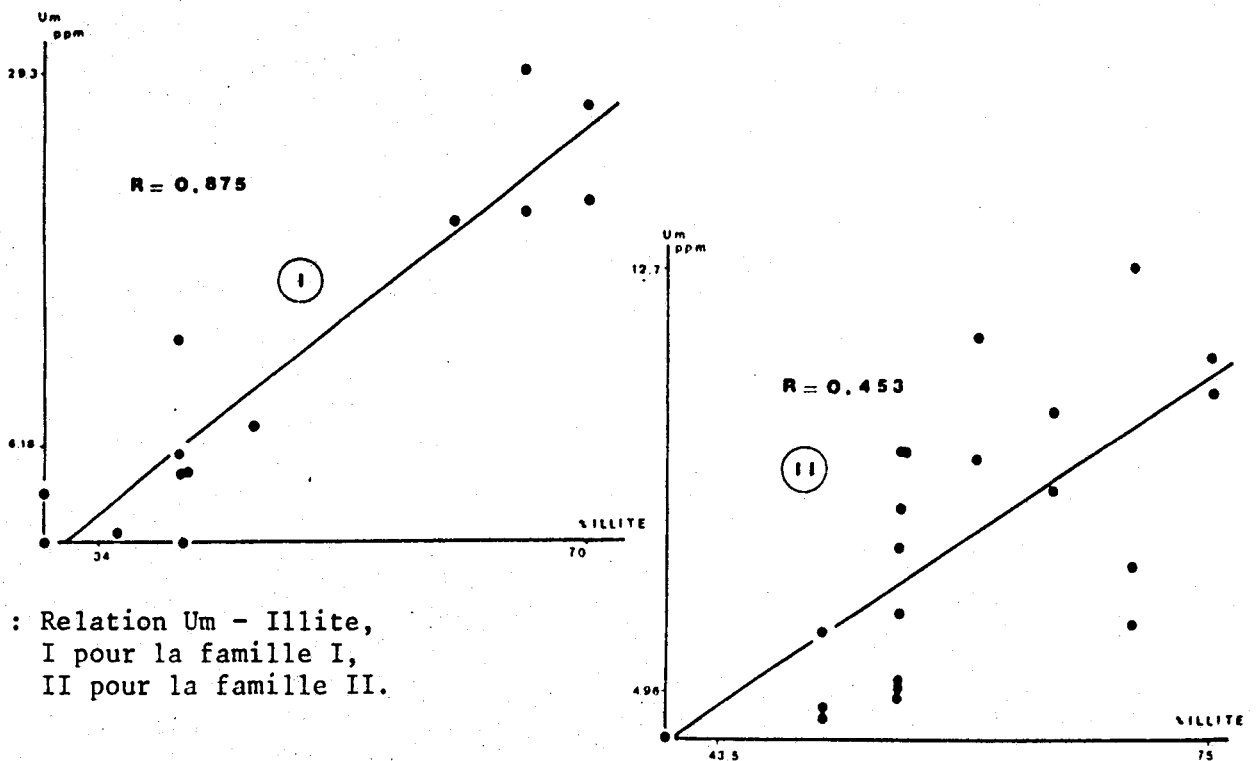


Fig. 128 : Relation Um - Illite,  
I pour la famille I,  
II pour la famille II.

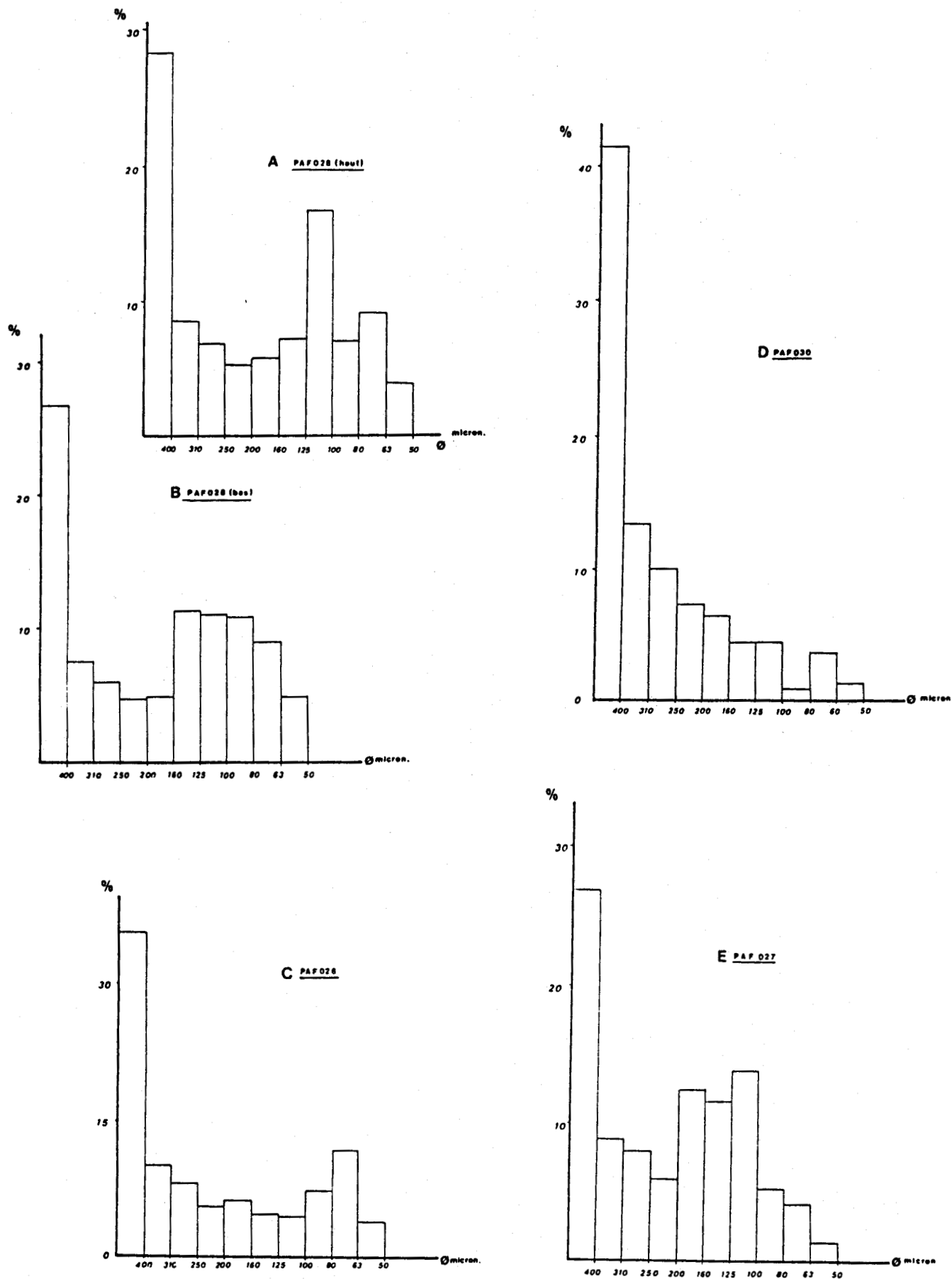


Fig. 129 : Granulométrie des remplissages: histogrammes de répartition des classes granulométriques.

- la faiblesse relative de la contribution des fines ( $\phi > 63 \mu$ ).

Si on considère l'allure des courbes de fréquence (fig.130) : l'assymétrie vers les "grossiers" est nette, toutes les courbes sont plurimodales, montrant ainsi l'hétérogénéité du remplissage.

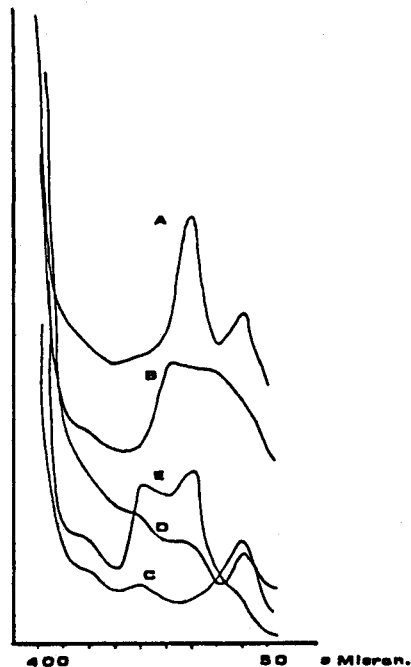
Les données précédentes ont été complétées par une granulométrie des fines réalisée à l'aide d'un "Sédigraph"\*. Grâce à cet appareil, j'ai pu réaliser une granulométrie des particules de dimensions inférieures à 100 microns. Je présente en figure 134 les types de courbes obtenus. Dans tous les cas, la décroissance de la courbe cumulative en allant vers les très fines est rapide, confirmant ainsi la pauvreté relative en matériel fin déjà mis en évidence par les tamisages.

De ces divers renseignements, je tire que l'hétérogénéité du sédiment est nette. Les origines des diverses familles d'éléments constitutifs peuvent être multiples :

- héritage des formations grésos-schisteuses incombantes,
- apports supergènes post-paléozoïques,
- néoformation d'éléments liée à l'évolution chimique des matériels présents.

Je tenterai de montrer quelle est la part de chaque origine possible dans ce qui suit (paragraphes 4-2 2 et 4.2.3). Dans le chapitre III, de cette troisième partie, j'étudie les relations qui peuvent ou non exister entre l'activité et les données de la granulométrie.

Fig. 130 : Allure des courbes de fréquence tracées à partir des histogrammes de la figure 129.

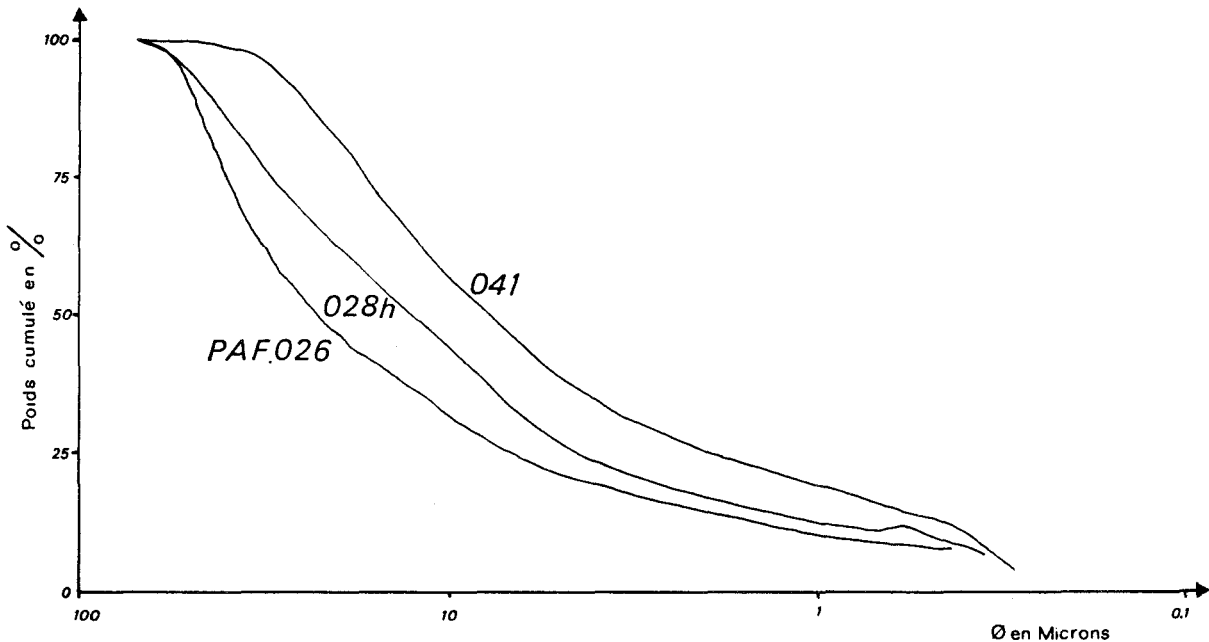


\* J'ai réalisé ces analyses, ainsi que la préparation des pâtes orientées étudiées en diffraction "X" avec le matériel du Laboratoire de Sédimentologie de l'UER des Sciences de la Terre de l'U.S.T.L., mis à ma disposition par M. le Professeur H. CHAMLEY.

Figure 131

Analyse granulométrique

SEDIGRAPH



#### 4.2.2. ETUDES OPTIQUES

Dans un premier temps, j'ai observé certaines fractions granulométriques à la loupe binoculaire. De cet examen, je tire la confirmation de l'hétérogénéité du matériel, on y rencontre : d'une part, des débris lithiques et, d'autre part, une fraction limonitique importante, d'origine évidemment supergène. Afin de mieux observer les éléments constitutifs des remplissages et notamment les oxydes de fer, j'ai réalisé (ou fait réaliser):

- des inclusions de certaines fractions granulométriques,
- des surfaces polies dans des éléments centimétriques (encroûtement ferrugineux, débris rocheux);
- des lames minces dans des débris rocheux encroûtés, imprégnés d'oxydes de fer.

##### 4.2.2.1. Détermination optique de la composition minérale

Je distingue deux grandes familles d'éléments constitutifs: les éléments hérités de l'environnement rocheux paléozoïque et les éléments d'origine supergène.

Le premier groupe est essentiellement constitué de débris lithiques, de taille variable, issus de la fracturation et dont la composition minérale de base est celle des roches environnantes (paragraphe 4-1). Ils sont fortement altérés. Je reviendrai sur leur comportement vis à vis de la radioactivité au chapitre V de cette 3ème partie.

PLANCHE V

BU  
LILLE

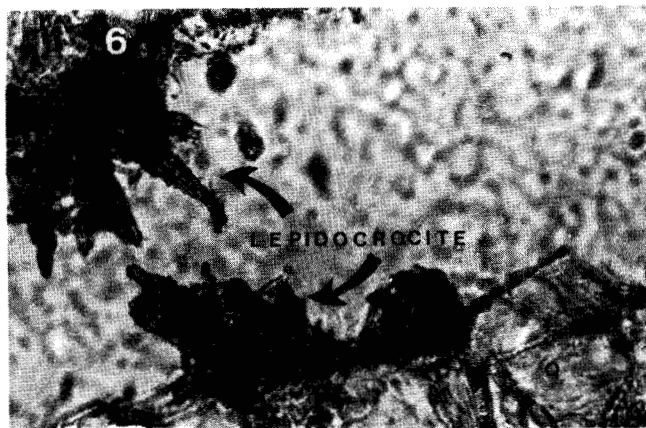
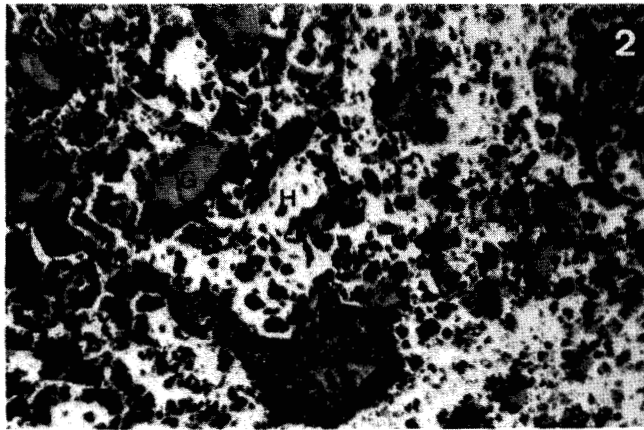
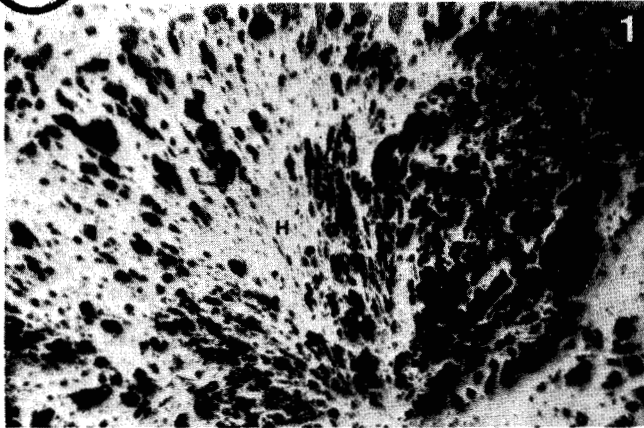






PLANCHE PHOTO V  
LEGENDE

PHOTO. 1 : Hématite en éventail (X 100).

PHOTO. 2 : Association Hématite - Goethite dans un encroûtement ferrugineux  
(X 100).

PHOTO. 3 : Grain de limonite globuleux inclu dans de la résine (X 100).

PHOTO. 4 : Croûte d'Hématite - Goethite accrochée à la roche (X 100).

PHOTO. 5 : Quartz automorphe et son "chapeau" d'Hématite (X 500)  
Microfracture d'un débris lithique.

PHOTO. 6 : Cristaux de Lépidocrocite en rosette développés sur des grains  
Quartz (X 500).

\*Pour les déterminations optiques j'ai utilisé les données de l'ATLAS DES  
MINERAUX METALLIQUES de M.PICOT et Z.JOHAN (1982)

PLANCHE VI

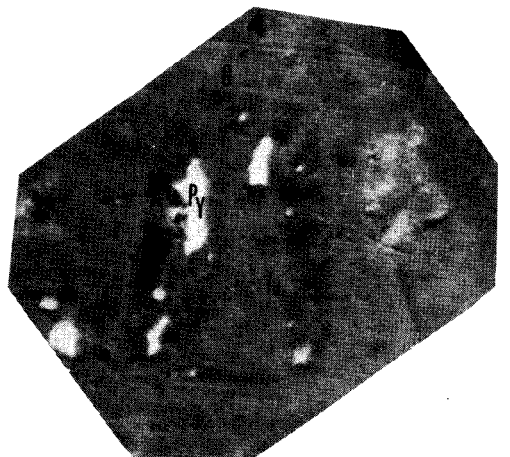
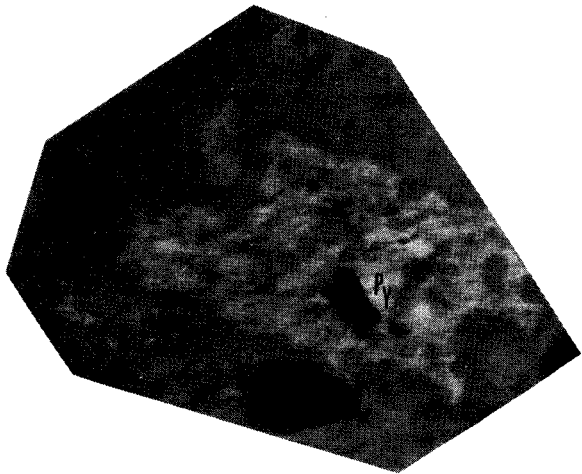
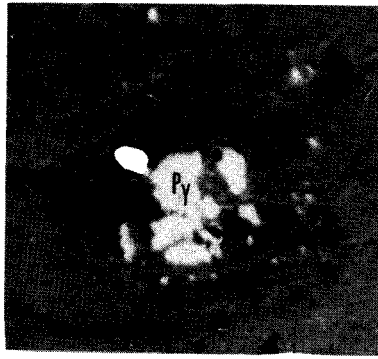


PLANCHE PHOTO VI  
LEGENDE



Toutes les photographies ont été réalisées sur la même surface polie. Celle-ci a été taillée dans un encroutement ferrugineux prélevé dans une fracture à remplissage fortement radioactif (P.A.F.024).

PHOTO. 1 : Cristal cubique de Pyrite déjà fortement altéré, entouré de Goethite (X 125).

PHOTO. 2 : 2<sup>ème</sup> stade d'altération relevé dans le matériel observé : la structure de la Pyrite est bien visible,

les  
plages pyriteuses sont encore assez larges (X 125).

PHOTO. 3 : Remarques identiques aux précédentes.

PHOTO. 4 : Quasi disparition de la Pyrite au profit de la Goethite, "dessin" d'un fantôme de cristal. (X 125)

PHOTO. 5 : Fantôme de cristal de Pyrite : celle - ci n'est plus présente qu' à l'état de petit point pyriteux (X 60).

Le second groupe est composé d'éléments d'origine supergène. J'y distingue deux types d'éléments : du quartz en cristaux automorphes et des oxydes de fer encroûtants. La composition minérale de ce groupe apparaît liée à l'altération chimique et à la percolation de fluides oxydants *per descensum*.

A la planche photographique V, je présente des exemples d'oxydes de fer rencontrés dans les remplissages. La tendance encroûtante me paraît bien illustrée par les photos 3 et 4 : nature globuleuse de la limonite (photo 3), croûte ferrugineuse sur roche (photo 4). Les photographies 5 et 6, issues de lames minces taillées dans des débris lithiques, montrent des quartz automorphes, fréquents, celui de la photo 5 est porteur d'un chapeau d'hématite. En photo 6, on peut observer des rosettes de petits cristaux aplatis, minces, rouges dont la présentation m'amène à penser qu'il s'agit de Lépidocrocite ( $\gamma$  FeOOH). Ce minéral, le "mica de fer", a la même chimie et des propriétés voisines de celles de la goéthite ( $\alpha$  FeOOH) dont il est une forme métastable.

La présence de ces hydroxydes de fer n'est pas étonnante car cette forme de cristallisation du fer est classique après la solubilisation du fer lors de l'altération d'un matériel primaire. L'origine supergène de ces éléments ne fait donc, ici, aucun doute.

La planche photographique VI présente un phénomène classique, relativement rare à l'échelle de mes observations. En effet, si j'ai observé la présence de petits éléments pyriteux au sein des oxy-hydroxydes de fer, je n'ai pu observer l'évolution de l'oxydation de la pyrite que sur l'échantillon de la planche VI. Ce qu'il faut poser comme problème, c'est celui de la provenance de cette pyrite : est-elle détritique ? constitue-t-elle les vestiges d'un filon sulfuré ? Aucun argument ne me permet de trancher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse. Tout au plus, sa relative rareté m'amène à pencher pour la première hypothèse.

#### 4.2.3. ETUDES EN DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X

##### 4.2.3.1. Introduction

J'ai cherché à déterminer deux choses au cours de cette étude : la minéralogie des remplissages à partir de la " roche totale", la composition de la fraction argileuse ( $\emptyset < 2 \mu\text{m}$ ) sur pâtes orientées.

Par ailleurs, A.E. MISERY (1982) dans sa thèse de Doctorat de 3ème Cycle, traitant des chapeaux de fer belges, présente une étude des oxyhydroxydes de fer, notamment sur l'état de cristallinité de la goéthite

(à partir des travaux de E.R. LANDA *et al* (1973) et de U. SCHWERTMANN (1972)). Observant nettement les pics de la goethite et de la lépidocrocite, sur mes diffractogrammes, j'ai tenté une approche de ce problème.

#### 4.2.3.2. Composition minéralogique

L'analyse en diffractométrie des rayons X de la "roche totale" permet de distinguer deux grandes familles minéralogiques au sein des remplissages de fractures : la part liée à l'héritage (élément provenant des roches incombantes et la part liée à la "métallogénie" des fractures.

J'ai rencontré en abondance :

- .dans le premier groupe : du Quartz, des argiles (Illites);
- .dans le second groupe : des argiles (Kaolinites, Interstratifiés, du Quartz des hydroxydes de fer (Goethite, Lépidocrocite).

J'ai trouvé à l'état de traces : de la Magnétite, de la Pyrite. Par ailleurs, les graphiques présentent tous un bruit de fond important lié à la présence d'Hématite (qui mal cristallisée s'exprime sous cette forme).

J'ai fait participer le Quartz à ces deux groupes car, l'observation optique l'a démontré, il est présent dans les remplissages sous deux formes : à l'état de débris lithiques (venant des roches incombantes), en beaux cristaux, c'est alors du quartz recristallisé après mise en solution par les eaux de percolation, il va de paire avec le caractère limonitique du remplissage.

Les pics de l'Illite montrent qu'elle a été altérée (dégradation des pics).

La Kaolinite montre des pics bien exprimés. Ce minéral et les Interstratifiés sont des minéraux liés à l'altération. Leur origine est ici liée à l'évolution supergène, post-paléozoïque, de la région .

Là où l'apport des rayons X a été le plus intéressant, c'est sans conteste au niveau des minéraux du fer. L'étude optique avait montré l'existence de l'Hématite et de la Goethite, de rares cristaux de Pyrite qui avaient été observés (planche photo VI). La présence de ces éléments a été confirmée lors du dépouillement des diffractogrammes ainsi que celle de la Lépidocrocite (le "mica de fer").

#### 4.2.3.3. Etude de la fraction argileuse

J'ai réalisé deux types d'investigations à partir des diffractogrammes réalisés sur des pâtes orientées de la fraction argileuse du sédiment :

- l'étude des argiles,

- l'étude des oxy-hydroxydes de fer.

L'exemple de la figure 132 indique que la minéralogie de cette classe granulométrique ne diffère pas de celle de la "roche totale".

a) Les minéraux argileux

J'ai identifié, à partir des tables et abaques de A.J. ROSE (1970) l'Illite, la Kaolinite, les Interstratifiés (12 Å) (fig.132).

Les pâtes orientées et glycolées m'ont permis d'établir les pourcentages relatifs des diverses espèces minérales déterminées (fig.133).

Il est important de constater la présence de l'Illite héritée qui confirme le caractère détritique d'une partie du matériel. La présence de Kaolinite et d'Interstratifiés minéraux très sensibles à l'élévation de la température apporte deux renseignements : la part non héritée des roches

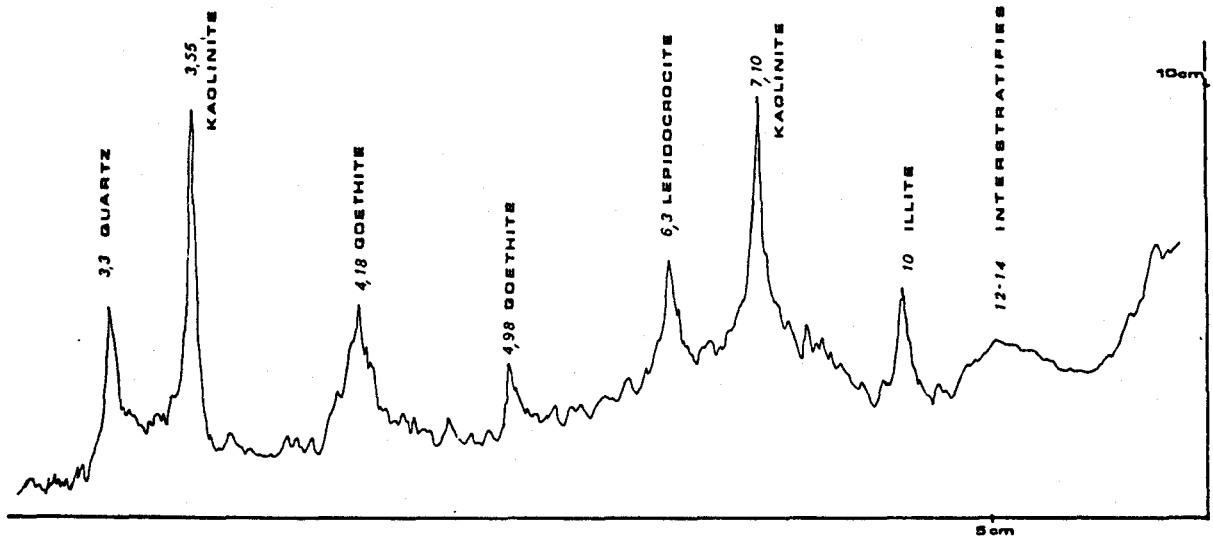


Fig. 132 : Exemple de diffractogramme de la fraction argileuse d'un remplissage de fracture.

Fig. 133 : Proportions relatives en minéraux argileux.

N° échantillon PAF	ILLITE %	INT. %	KAOL. %
24	35	35	45
25	50	15	35
26	45	25	30
27	35	20	45
28	40	25	35
29	30	20	50
30	30	30	40
31	35	20	45
32	30	30	40
38	30	20	50

paléozoïques est importante, leur présence confirme le caractère post-paléozoïque de ce matériel limonitique car leur sensibilité à l'élévation de la température ne leur aurait pas permis de résister au métamorphisme régional épizonal, dû à l'orogénèse hercynienne.

b) Les minéraux de fer

Cette étude m'a permis au niveau des hydroxydes de fer d'établir les proportions relatives de Goethite et Lépidocrocite (fig.134).

L'intérêt de l'étude de ces minéraux du fer découle du fait que tous deux ont la même chimie (Lépidocrocite :  $\gamma$  FeOOH, Goethite :  $\alpha$  FeOOH) et que le passage de la forme  $\gamma$ , métastable, à la forme  $\alpha$  stable se fait par mise en solution de la Lépidocrocite (SCHWERTMANN et TAYLOR, 1972). Les travaux de ces auteurs, ainsi que ceux de LANDA et GAST (1973) et de MISERY (1982) m'ont amené à envisager l'état de cristallisation des hydroxydes de fer. Comme MISERY (1982), j'ai choisi de faire cette étude à partir de la largeur à mi-hauteur du pic à 6,3 Å pour la Lépidocrocite, du pic à 4,18 Å pour la Goethite (fig. 132).

Les variations de l'état de cristallinité de la Lépidocrocite apparaissent plus importantes que pour la Goethite. Ceci pourrait être dû à des différences dans la recristallisation de la Lépidocrocite en Goethite. Ainsi il est à noter que les fractures les plus ouvertes (PAF 27,28,30) montrent des indices de cristallinité de la lépidocrosite moins élevés que celles qui sont plus étroites (PAF 25,26,32).

N° échantillon PAF	GOETHITE %	LEPIDOC. %	Cie G	Cie L
24	75	25	18	8.25
25	75	25	19.6	14.28
26	90	10	18.16	20
27	95	5	14.6	3
28	85	15	18.6	7.5
29	85	15	12.25	8
30	90	10	17	0.1
31	95	5	14.5	2.8
32	65	35	16.8	15
38	65	35	18.65	6.5

Fig. 134 : Proportions relatives en hydroxydes de fer et leur état de cristallinité.



A.E. MISERY (1982) a proposé une typologie de la morphologie des fonds continus en diffraction X. Elle a observé une évolution de cette morphologie en fonction de la richesse relative en hydroxydes de fer exprimés. Il semblerait que les échantillons analysés à Oizy soient à reporter au type "d" défini par cet auteur (fig.135). Je ferai cependant une restriction car MISERY cherchait à établir un guide de prospection pour les chapeaux de fer alors que rien ne nous permet d'affirmer ici qu'il en existe un à Oizy. La richesse, relative, en Lépido-crocite pouvant même laisser penser que le matériel ferrifère des remplissages est plutôt d'origine pédogénétique.

#### 4.2.3.4. Relations entre les données de la diffractométrie des rayons X et les teneurs en Uranium

##### a) Relations minéraux argileux - Uranium

En figure 136, je présente un graphique des variations des proportions de minéraux argileux au sein de la fraction inférieure à 2 microns mis en parallèle avec les teneurs en équivalent Uranium.

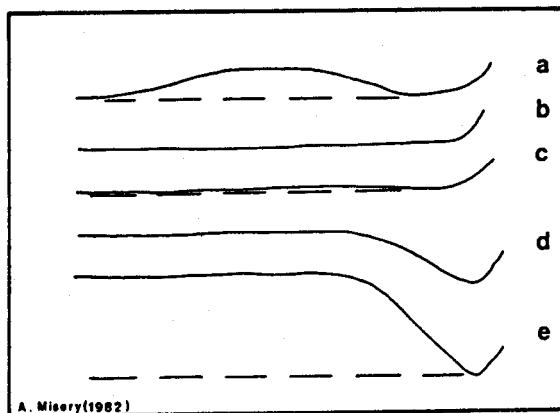
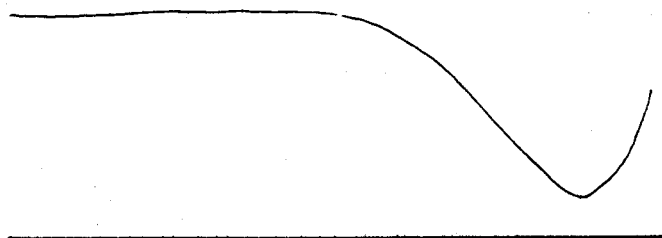


Fig. 135 : OIZY, exemple de morphologie des fonds continus en diffraction des rayons "X"

- a hydroxydes de fer amorphes
- b rares hydroxydes de fer exprimés
- c 27% de  $Fe_2O_3$  exprimés en hydroxydes de fer
- d échantillons très riches en hydroxydes de fer exprimés
- e échantillons riches en  $FeOOH$  et oxydes de Manganèse.)



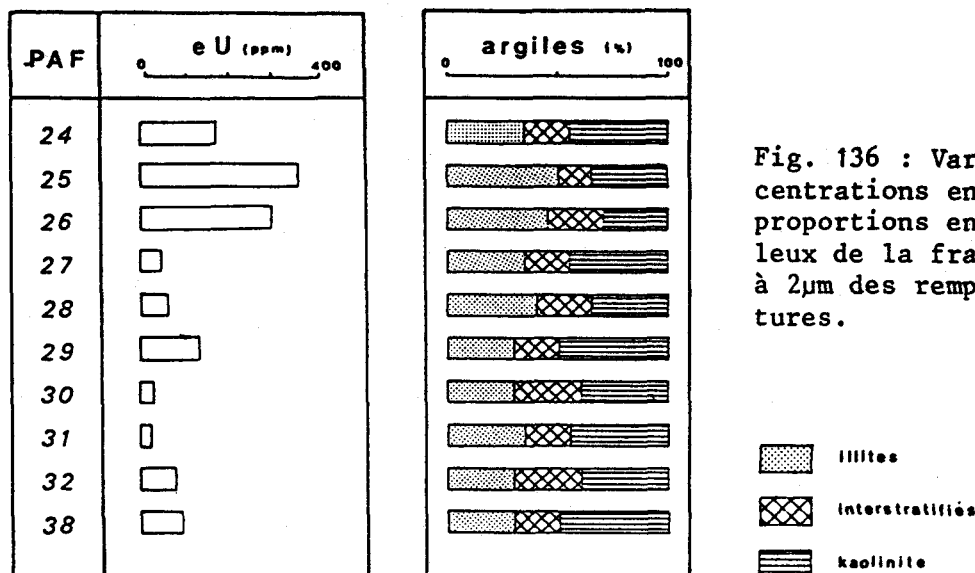


Fig. 136 : Variations des concentrations en Uranium et des proportions en minéraux argileux de la fraction inférieure à 2µm des remplissages de fractures.

Comme pour les roches, il n'y a pas de relation directement évidente. Cependant, j'ai établi la relation en Uranium métal et le pourcentage d'Illite (fig.137). Malgré un nombre restreint d'échantillons, je distingue deux familles d'individus : la famille I regroupe les plus riches en Uranium, la famille II les plus pauvres en Uranium et les plus riches en débris lithiques et en matériel provenant de la couverture plio-quaternaire.

Il semble donc qu'il y ait dans les remplissages deux types de comportement de l'Uranium vis à vis des Illites. La distinction de ces deux familles peut se faire aussi à partir de la Kaolinite. La relation mettant en jeu l'Uranium en fonction du pourcentage de Kaolinite présente est à l'inverse de la première. Ceci revient à écrire que plus il y a d'Illite présente, moins on a de Kaolinite. Les échantillons riches en Illite sont aussi les plus riches en Uranium métal. Ainsi qu'on a pu le voir en 4.2.3., ces Illites sont héritées mais altérées (dégradations de pics en diffractométrie). L'Uranium se fixe probablement par absorption sur ces Illites dégradées. Cette tendance, illustrée par la figure est intéressante, mais il convient de rester prudent, vu le faible nombre d'échantillons analysés.

#### b) Relations Hydroxydes de fer-Uranium

Comme on a pu le lire en paragraphe 4.2.3. de ce chapitre, j'ai établi les proportions relatives de Goethite et de Lépidocrocite au sein de la fraction argileuse, j'ai de plus mesuré l'état de cristallinité de ces minéraux (fig.138). Je me suis intéressé à ceux-ci du fait de la richesse en fer des remplissages et de la mise en évidence de la liaison fer-Uranium

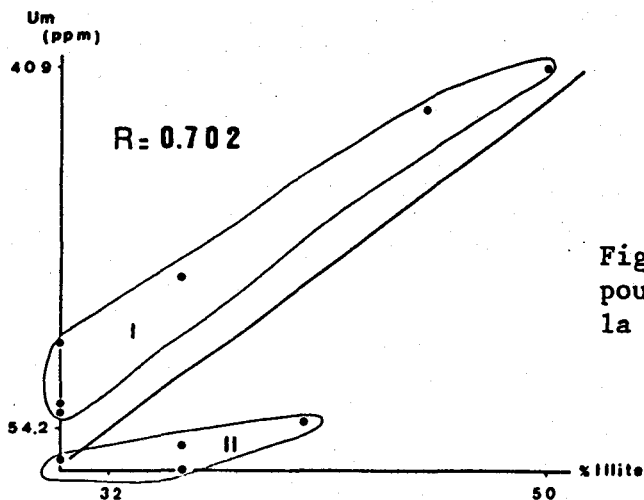


Fig. 137 : Relation  $U_m$  - Illite pour les échantillons P.A.F. de la carrière d'Oizy.

dans des hydroxydes de fer signalée dans la littérature (1ère partie, Chapitre II, 2-1-5). J'ai établi les diverses relations linéaires qu'il est possible d'envisager entre l'Uranium et les données de l'analyse en diffraction X. Il n'apparaît de relations que dans le cas de la liaison  $U_m$ -Cristallinité de la Lépidocrocite (fig.139). Fait intéressant, on retrouve les mêmes familles que dans la relation établie entre l' $U_m$  et l'Illite. Ainsi, il semble que les échantillons à haute cristallinité et à forte teneur en Uranium (plus de 60 ppm) se groupent alors que ceux à faible teneur en  $U_m$  et à cristallinité faible (ou mauvaise) constituant la seconde famille. La richesse en fer (coloration rouge intense du sédiment, pauvreté relative en débris lithiques) des échantillons de la famille I est à opposer à la pauvreté relative des échantillons de la famille II. Un dosage du fer se justifie donc.

De plus, la distinction des 2 familles peut laisser penser qu'elles n'ont pas eu les mêmes évolutions "pédologiques" depuis la fixation de

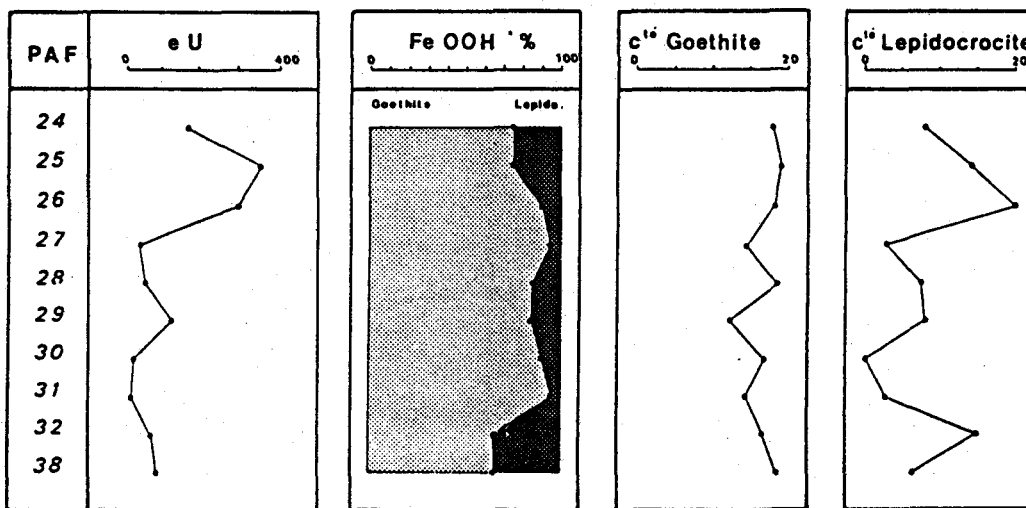


Fig. 138 : Evolution des teneurs en Uranium, des proportions de Goethite - Lépidocrocite et de l'état de cristallinité de ces minéraux.

l'Uranium. La famille I traduirait une meilleure protection du matériel des agents conduisant au départ de l'Uranium des échantillons de la famille II (lessivage, descente du front d'oxydo-réduction, "pollution" par la couverture plio-quatenaire).

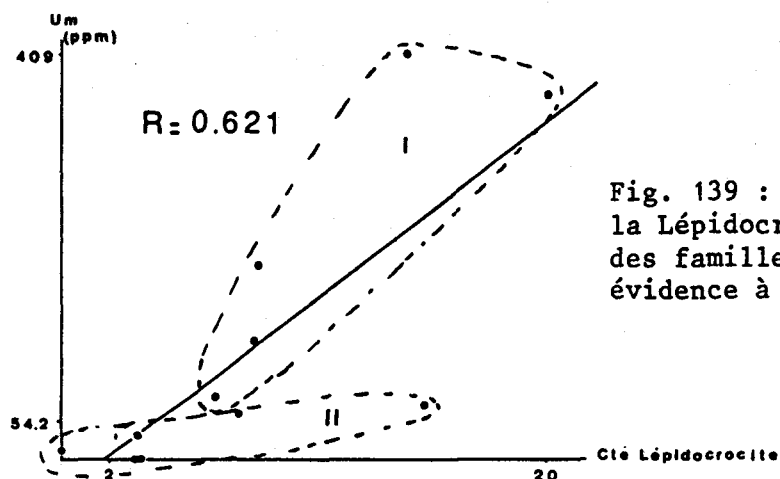


Fig. 139 : Relation Um - Cté de la Lépidocrocite, distinction des familles I et II mise en évidence à partir de l'Illite.

#### 4.3. ORIENTATION A DONNER AU TRAVAIL

Des diverses études déjà décrites, notamment des études minéralogiques on peut conclure qu'il serait intéressant :

- de procéder à une analyse en autoradiographie et en anticoïncidence pour chercher à cerner les sites préférentiels de la localisation de la radio-activité dans les échantillons (3ème partie, chapitre V);
- de doser le fer (3ème partie, chapitre VI);
- de réaliser l'étude de la répartition des radioéléments, en fonction des lithofaciès (3ème partie, chapitre VI);
- d'effectuer une analyse multivariable afin de combiner les diverses informations accumulées au cours de l'ensemble des travaux (3ème partie, Chapitre VII).





CHAPITRE V

ETUDE EN AUTORADIOGRAPHIE &  
EN ANTICOINCIDENCE







## CHAPITRE V.- ETUDE EN AUTORADIOGRAPHIE ET EN ANTICOINCIDENCE

### 5. 1. INTRODUCTION

J'ai reporté en Annexes V et VI la description des deux méthodes utilisées pour les études que je présente dans ce chapitre. Le but recherché était la localisation des radioéléments ainsi que l'étude de leur comportement au sein de certains échantillons. J'ai appliqué ces techniques sur les remplissages comme sur les roches.

### 5.2. ETUDE DES REMPLISSAGES DE FRACTURES

#### 5.2.1. ETUDES EN AUTORADIOGRAPHIE

J'ai exposé, au rayonnement alpha, émis par les remplissages deux types de préparations :

- des frottis ou inclusions de fractions granulométriques comprises entre 100 et 400 microns;
- des lames minces ou des surfaces polies taillées dans des éléments centimétriques appartenant à la fraction grossière du sédiment.

Les résultats de la spectrométrie gamma, montrent des concentrations assez élevées en Uranium métal, ceci paraît permettre une forte concentration de traces en autoradiographie, j'ai appliqué cette méthode. Sur les frottis ou inclusions, les résultats ont été assez inégaux. Pour ce qui est des encroûtements ferrugineux (surfaces polies), il découle de cette étude deux faits importants :

- il n'y a pas de concentration particulière d'impacts de particules alpha, celles-ci sont réparties à peu près uniformément au sein de la matrice ferrugineuse;
- les traces de Pyrite observées ne sont pas associées à des groupements d'impacts, fait qui découle un peu de précédent. Classiquement, dans l'étude de phénomène d'oxydation et migration de l'Uranium dans des Roll-Front, la reconcentration de l'Uranium à la périphérie de Pyrite oxydée et au niveau de phénomène de pyritisation secondaire est courante (SAMAMA, 1982; DORCHIES, 1984), il ne semble pas que ce soit le cas à Oizy.

PLANCHE PHOTO VII.

LEGENDE

ZONE A.

PHOTO 1 - 2 - 3 : Microfractures emplies d'Hématite - Goethite dans leur matrice de Quartzophyllades.

PHOTO 4 : Film sensible aux émissions alpha : morphologie de la répartition des impacts calquée sur celle du filon de Limonite.

ZONE B.

PHOTO 5 : Aspect de la roche imprégnée par les oxydes de fer.

PHOTO 6 - 7 : Microgéode au sein de la limonite - Goethite mammelonnée.

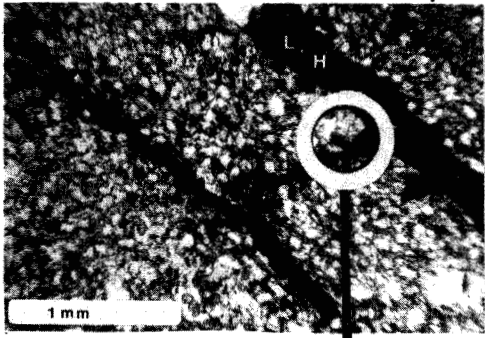
PHOTO 8 : Impacts de particules alpha sur le film sensible, les zones les moins atteintes correspondent aux éléments constitutifs de la roche porteuse.

ZONE C.

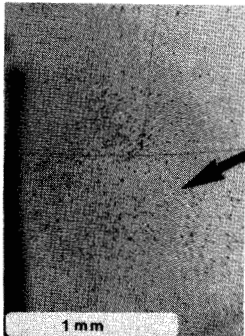
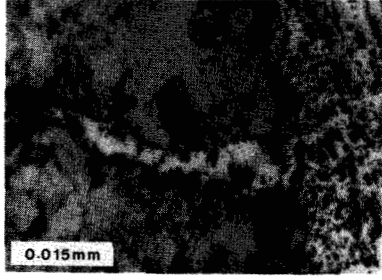
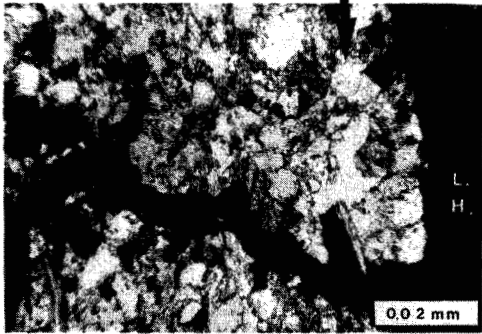
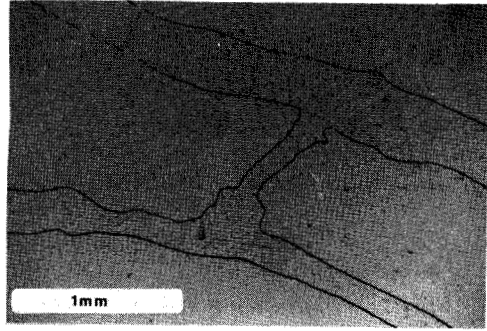
PHOTO 9 : Aspect de la microfracture en cet endroit.

PHOTO 10 : Traces alpha observées au droit des oxydes de fer.

PLANCHE VII



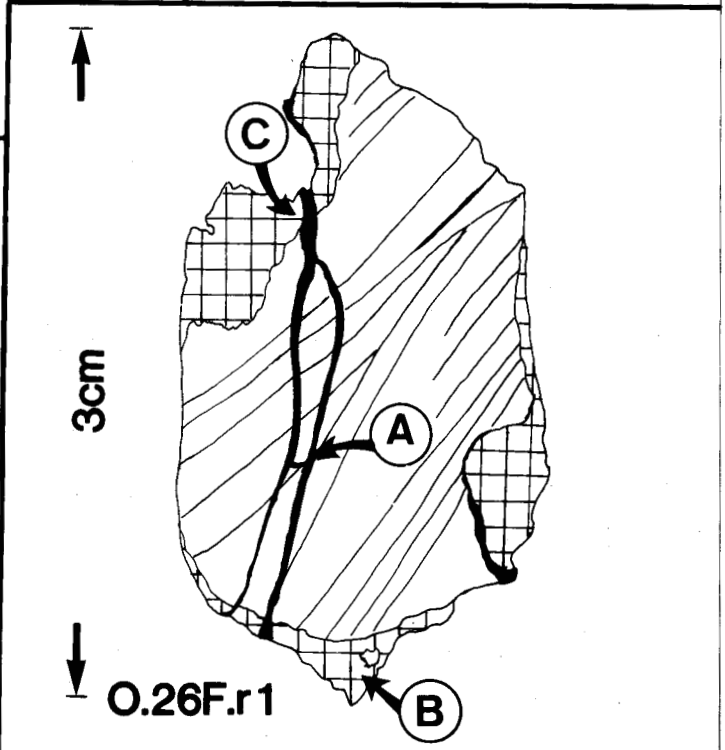
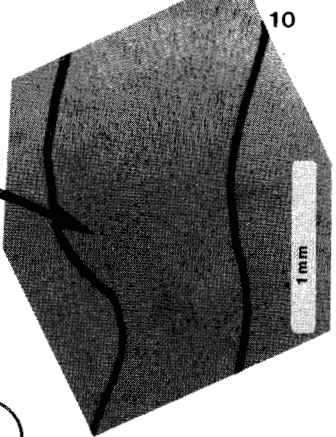
(A)



(B)



(C)



J'ai obtenu une belle illustration de l'association Uranium-Fer (oxydes) dans le cas de l'autoradiographie de lames minces taillées dans des débris lithiques imprégnés d'oxy-hydroxydes de fer (Planche photo VI).

Je présente le cas de la lame 026 Fr 1 . C'est un fragment de quartzophyllade à stratification entrecroisée "imbibée" d'oxyde de fer et parcouru d'une microfracture bifide oblitérée par un filon limonitique.

Le développement du film a révélé que :

- les impacts sont d'autant plus nombreux qu'ils se situent au droit d'une zone riche en fer,
- le tracé caractéristique de la microfracture est souligné par un tracé identique d'impacts. A l'échelle microscopique, les radioéléments, émetteurs de particules alpha, sont distribués comme le fer.

#### 5.2.2. ETUDES EN ANTICOINCIDENCE

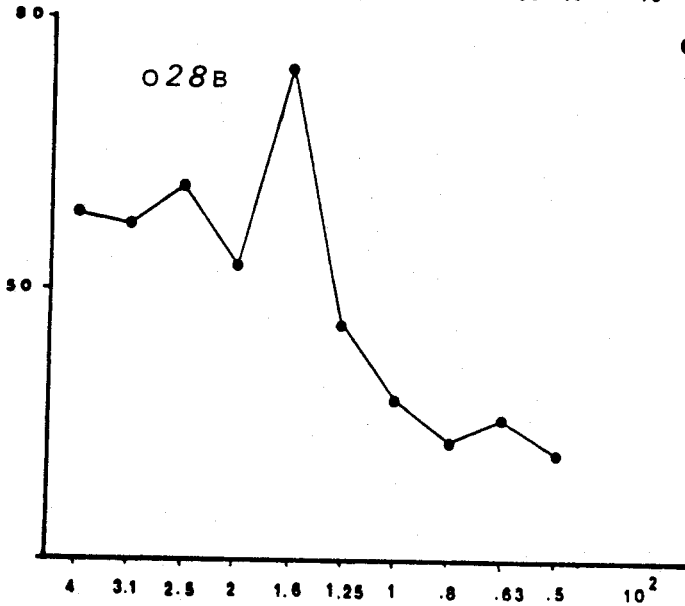
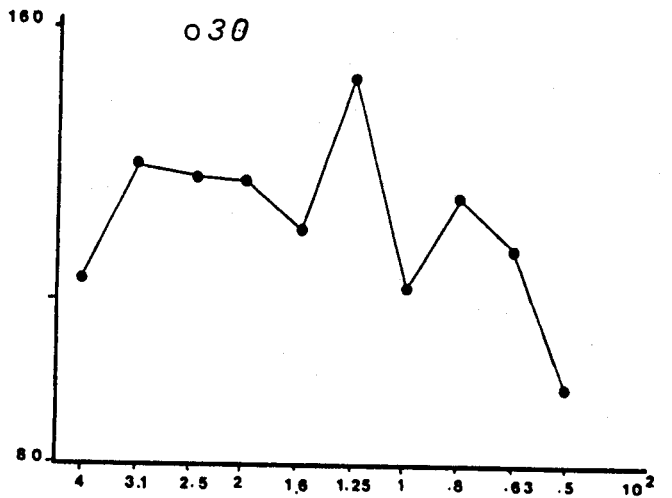
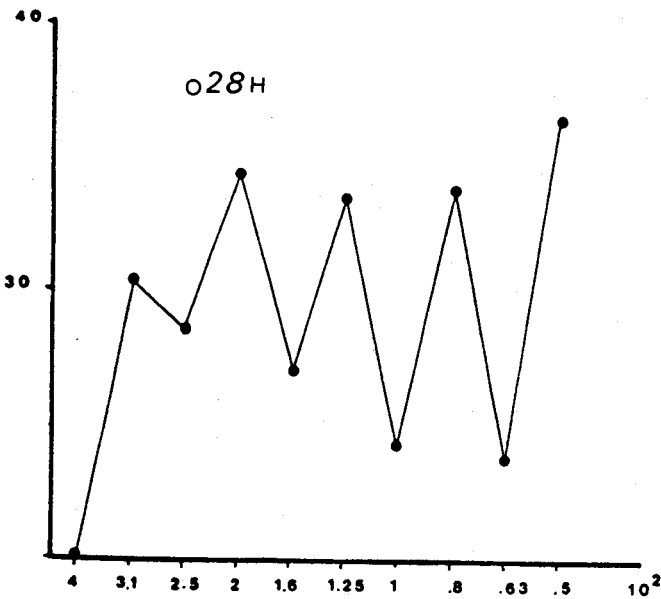
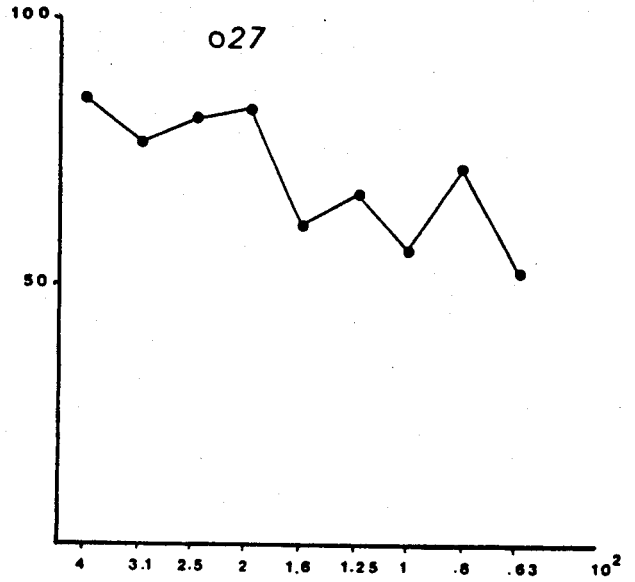
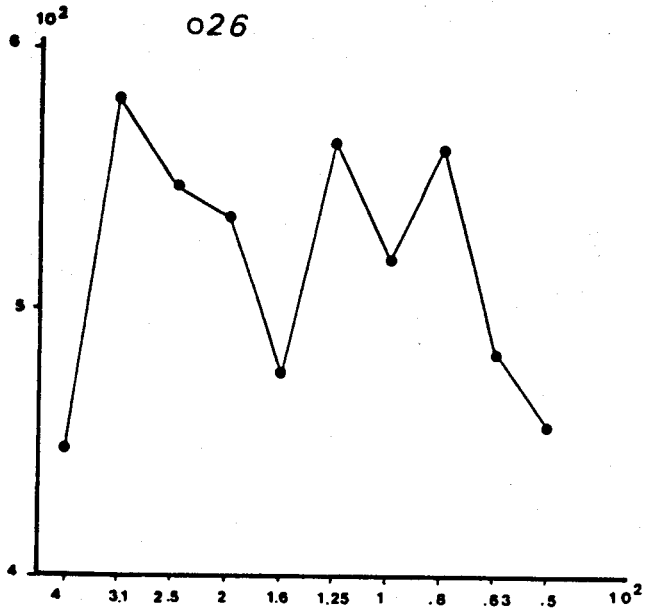
J'ai mesuré en antioïncidence l'activité :

- des fractions granulométriques étudiées au Chapitre IV,
- des concentrés minéraux obtenus au séparateur magnétique.

##### 5.2.2.1. Etudes couplées à la granulométrie

Tous les échantillons, dont la granulométrie a été faite, ont été analysés en antioïncidence pour chacune des classes granulométriques. Il n'apparaît pas à la lecture des résultats (fig.140) que la radioactivité soit concentrée dans une ou plusieurs classes granulométriques particulières. Les courbes de la figure sont assez dissemblables. Finalement, ce résultat est logique en regard de ceux de l'autoradiographie. En effet, le fer est présent dans toutes les classes sous les formes minéralogiques préalablement décrites (3ème partie, chapitre IV).

Dans le cas de la fracture PAF 028, j'ai pu effectuer deux prises d'échantillons, l'une située dans la partie supérieure de la fracture, la seconde dans la partie inférieure (1 m environ sépare les 2 prises). Sur le terrain, la coloration due au fer était moins intense dans la partie haute plus proche du contact avec le sol actuel que dans la partie basse. L'analyse granulométrique (fig.129) faisait déjà apparaître de petites différences. L'analyse en antioïncidence couplée à la précédente, confirme ces différences (fig.141). Au total, la partie inférieure, mieux protégée, du remplissage est plus active que la partie supérieure. Dans cette dernière, les éléments les plus fins ( $\emptyset < 100 \mu\text{m}$ ) sont ceux qui voient leur activité



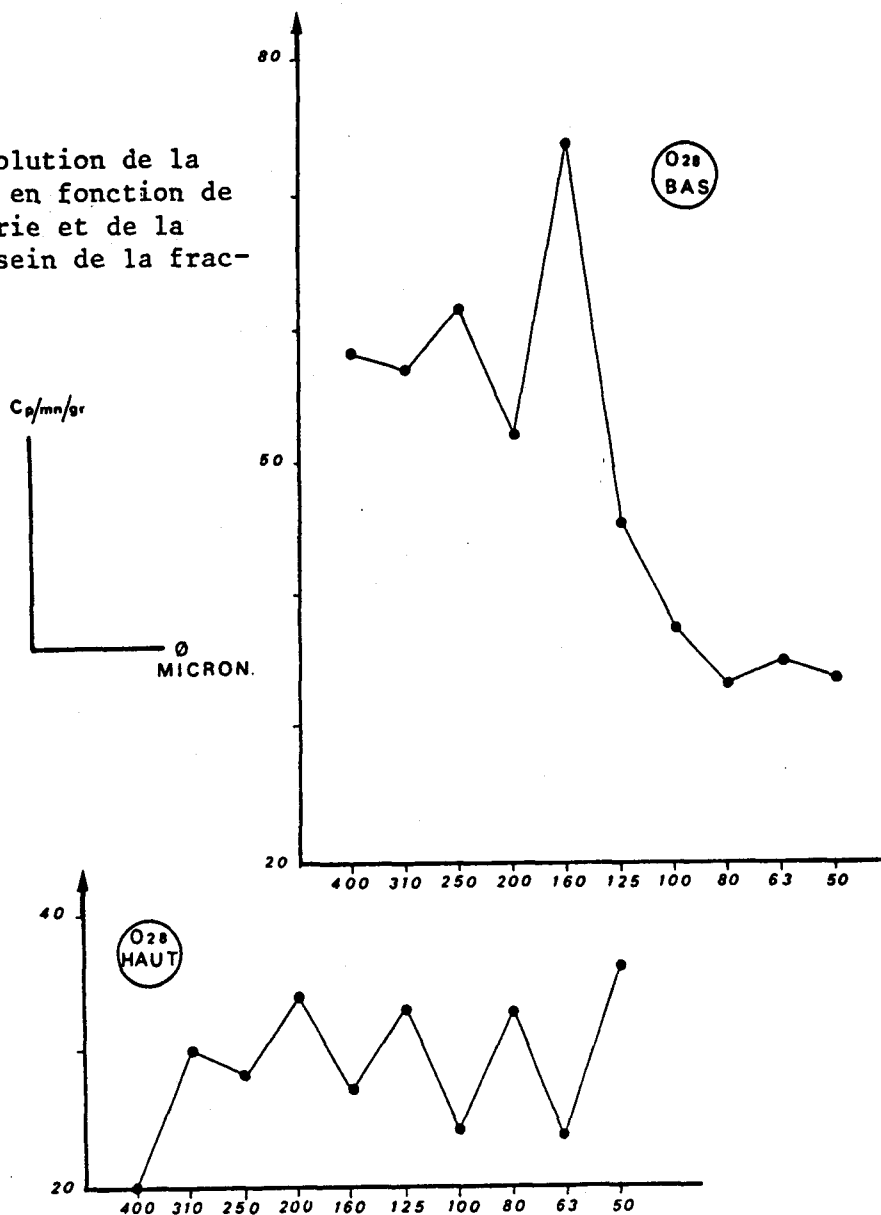
cp/mn/gr

ø micron.

Fig.140 : Evolution de la radioactivité en fonction de la granulométrie.

baisser le moins. Dans la partie inférieure, les éléments les plus actifs sont répartis dans les classes granulométriques les plus grossières (125 à 400  $\mu\text{m}$ ). Il semble donc que ces classes soient plus sensibles au lessivage actuel (plioquaternaire) que les classes inférieures.

Fig. 141 : Evolution de la radioactivité en fonction de la granulométrie et de la situation au sein de la fracture.



#### 5.2.2.2. Autres études

Sur ces remplissages limonitiques, j'ai réalisé en anticoïncidence les analyses suivantes :

- le dosage de l'activité de la fraction totale,
- le dosage de l'activité des fractions attirables et non attirables au séparateur Frantz à 0,8 A,

- le dosage de la fraction (traces) attirée à l'aimant manuel (Magnétite dans une gangue d'oxyde secondaire le plus souvent).

Je présente les résultats de ces comptages au tableau de la figure 142.

\* Le dosage de la fraction totale permet d'estimer la concentration en Uranium responsable de l'anomalie (voir 3ème partie, Chapitre II). Ainsi des fractures non dosées en spectrométrie gamma peuvent prendre place dans la hiérarchie des concentrations (033, ROB 31, ROB 35). On peut estimer que ROB 35 présente une concentration en Uranium de l'ordre de celle de PAF 024 (201 ppm d'Um), que ROB 31 est voisine de PAF 031 (15 ppm d'Um) et que 033 est proche de PAF 32 (61 ppm d'Um) ou de PAF 029 (134 ppm d'Um).

N° échantillon	ACTIVITES (cp/mn/gr)				% POIDS	
	Total	att. 0.8A	N.att.0.8A	Magnétite	att 0.8A	N att 0.8A
24	313	542	228	—	12	88
25	672	1265	202	5137	70	30
26	458	752	316	1436	40	60
27	67	—	—	—	—	—
28	62	72	46	—	65	35
29	93	919	68	1080	20	80
30	31	227	19	—	23	77
31	78	136	60	3080	29	71
32	108	—	—	—	—	—
33	127	116	113	—	44	56
38	89	—	—	—	—	—
ROB 31	71	—	—	—	—	—
ROB 35	281	470	76	—	54	46

Fig. 142 : Tableau des résultats des analyses en anticoincidence (autres que couplées à la granulométrie).



\* Dosage des fractions séparées par voie magnétique. Après les observations optiques, après les résultats de l'autoradiographie, j'ai cherché à isoler les oxy-hydroxydes de fer du reste du matériel. J'ai procédé par séparation électromagnétique; d'après PARFENOFF *et al* (1970), ces minéraux sont attirés à l'électro-aimant par le flux électro-magnétique créé par un courant de 0,8A. J'ai procédé à un certain nombre de séparations. J'en ai analysé le produit en anticoincidence (fig.142). 9 remplissages ont ainsi été étudiés. A l'exception de O33 F on peut constater une différence nette entre l'activité de la fraction attirable (Hématite, Goethite, Limonite) et celle de la fraction non attirable. Le pourcentage de participation de chaque fraction à la masse totale a été calculé afin de voir si les activités mesurées pour chaque fraction sont ou non compatibles avec l'activité de la "roche totale" mesurée initialement. Il semble que les résultats obtenus soient cohérents. Poussant plus loin l'analyse, il a été fait une spectrométrie gamma sur l'un des échantillons étudiés (PAF 026) la différence de concentration en radioélément enregistrée l'est sur les teneurs en Uranium. La partie attirable à 0,8 A est dosée à 531 ppm d'Um, la partie non attirable à 418 ppm d'Um.

De tout ceci, je tire comme conclusion que si la séparation magnétique concentre, dans la fraction attirable, les minéraux limonitiques, l'observation sous lampe binoculaire semble le prouver, l'activité plus forte de cette fraction étaye l'hypothèse selon laquelle l'Uranium est concentré dans les oxy-hydroxydes de fer. Les exceptions (O33 F par exemple, sont probablement dues au fait que la séparation magnétique des minéraux étudiés est assez délicate à réaliser.

Quatre des échantillons contenaient un peu de Magnétite. C'est ici un minéral détritique, dont les cristaux sont assez arrondis et le plus souvent encroûtés par des oxy-hydroxydes de fer secondaires. L'activité de ces traces (0,1 g de Magnétite pour 100 g de matière) n'est pas significative. Leur faible contribution à la masse totale ne leur donnent qu'un faible poids (1 %) sur l'activité totale. Ceci alors que l'activité de la fraction attirable à 0,8 A semble avoir le poids prépondérant sur le total de l'activité.

### 5.2.3. CONCLUSION

Il me semble établi que la liaison oxy-hydroxyde de fer - Uranium est une réalité perceptible. Il n'est par contre pas établi que la granulométrie des éléments, dans ce cas, ait une influence sur leur aptitude à concentrer l'Uranium. Ce qui est à établir maintenant, ce sont les modalités de la concentration de l'Uranium dans ces limonites.

### 5.3. ETUDE DES ROCHES

#### 5.3.1. ETUDE EN AUTORADIOGRAPHIE

##### 5.3.1.1. Les roches les plus actives

J'ai distingué au sein des roches analysées en spectrométrie gamma deux familles d'échantillons :

les épontes de fractures,

les roches qui présentent des concentrations anormales en Uranium.

Dans ce dernier groupe, j'ai réalisé quelques autoradiographies sur les roches les plus riches en Uranium métal (O16, O26, ROB 22 ...). Cependant, le seuil de détection efficace des films utilisés étant de l'ordre de 100 ppm, les résultats n'ont pas été probants. Il semblerait cependant que les impacts observés sur les films sensibles soient concentrés dans les mêmes sites que les oxydes de fer. J'ai notamment fait cette observation sur une lame taillée dans l'échantillon O26. Les impacts, peu nombreux, la teneur en Um étant de l'ordre de 20 ppm, se concentrent "sur" les oxydes de fer notamment sur la veinule limonitique présentée sur la photo 7 de la planche IV.

##### 5.3.1.2. Etudes des épontes

En débitant à la scie lapidaire une éponte de fracture, j'ai remarqué la décroissance du nombre des plages d'oxydes de fer lorsque l'on "pénètre" dans la roche saine. J'ai appliqué sur un échantillon, riche en plages oxydées (ROB 41) un film sensible. L'observation de ce film après 3 semaines d'exposition, montre une concentration importante d'impacts à proximité de la fracture, une diminution de leur nombre en "pénétrant" dans la roche saine. Les plus fortes concentrations sont au droit des amas ferrugineux proches du bord de la fractures. Ces résultats optiques sont présentés à la planche photographique VII.

Pour aller jusqu'au bout de l'exploitation de ce film, j'ai réalisé un comptage du nombre des impacts. J'ai comparé 2 procédés (fig.143) :

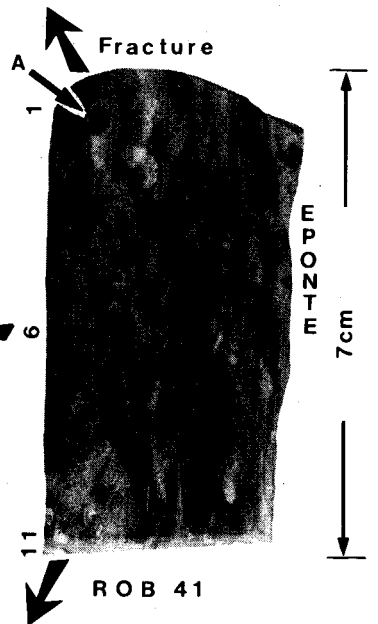
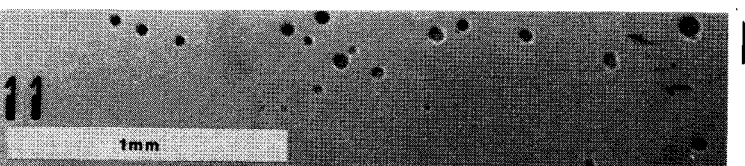
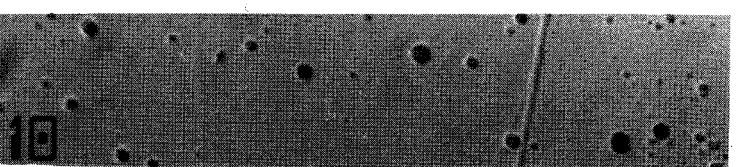
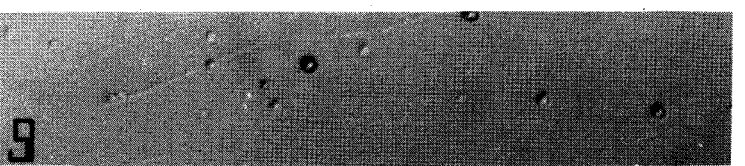
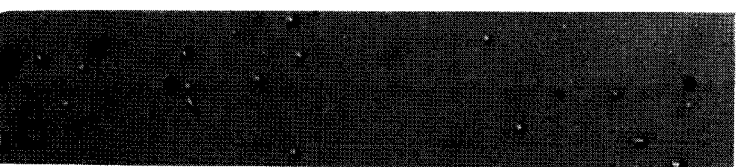
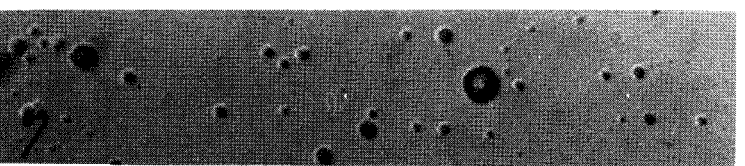
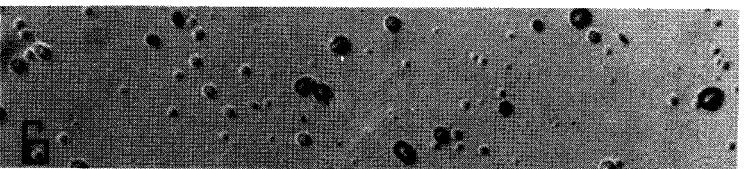
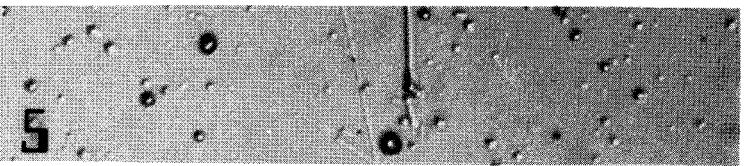
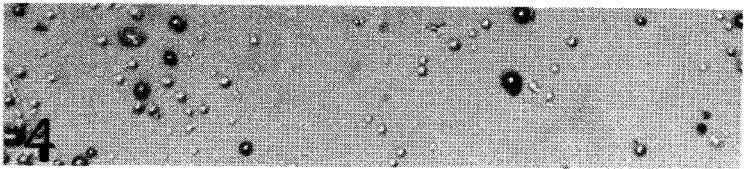
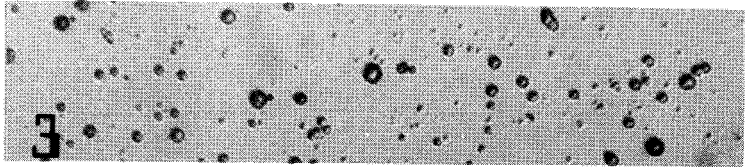
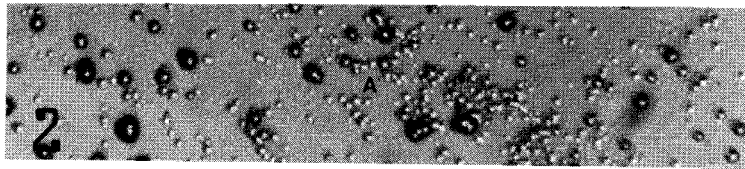
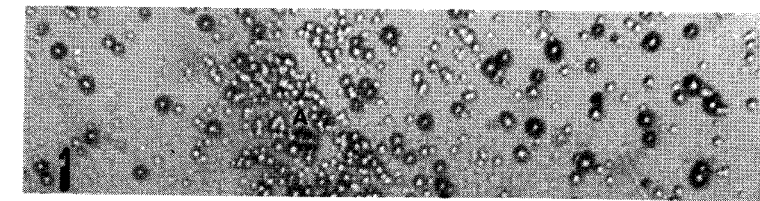
- . le premier, direct, consiste à utiliser un compteur de points après avoir divisé le film en plusieurs zones (13 dans le cas présent) de 0,5cm de large. Après avoir "balayé" un maximum de transversales, j'ai tracé la courbe (A) de la figure 143.
- . le second demande la réalisation d'une série de photographies, j'en ai fait 2 par zone dans onze de celles-ci préalablement déterminées. Après

## PLANCHE PHOTO VIII

### LEGENDE

Mise en évidence de la décroissance de la radioactivité ausein de la roche à partir de l'éponte (sens strict). Noter la diminution progressive de la densité des traces Alpha de la zone 1 à la zone11. En 1 et 2 la concentration plus importante observée au centre des bandes est due à une plage d'hydroxydes de fer (A).

PLANCHE VIII



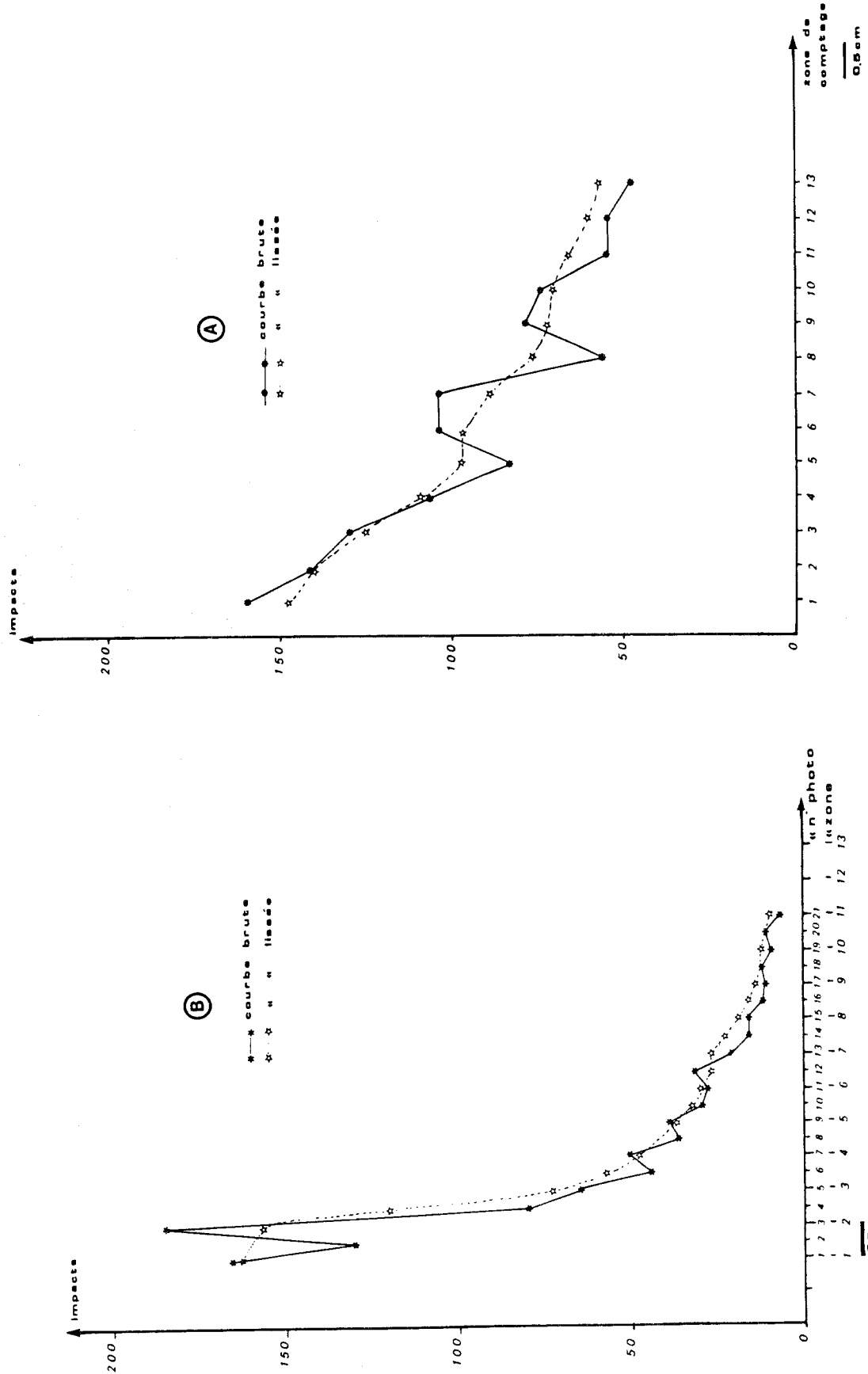


Fig. 143 : Détermination de la décroissance de la radioactivité au sein de la roche par le comptage du nombre d'impacts : A au compteur de points par tranche de 0.5mm B à partir de photographies à raison de 2 clichés par tranche de 0.5mm (la zone 1 est celle bordant la fracture).

tirage des films, j'ai procédé au comptage des impacts sur la totalité de la superficie photographiée. J'ai obtenu la courbe de la figure 143(B).

Les deux graphiques ont pour point commun de visualiser la décroissance du nombre d'impacts dus aux particules alpha. Le fait d'avoir une série de compage tous les 2,5 mm donne à la courbe (B) un aspect différent de celui de la courbe A qui est moins précise, semble t-il. J'explique les irrégularités dans les courbes par la présence d'une microfracturation qui amène localement des reconcentrations en oxydes de fer.

En conclusion, les résultats sont comparables, que l'on adopte l'une ou l'autre technique de comptage. Sur le plan pratique, la seconde technique est moins pénible pour l'analyste, l'observation de clichés photographiques avec un carroyage étant moins fatigante que l'observation microscopique.

### 5.3.2. ETUDES EN ANTICOINCIDENCE

#### 5.3.2.1. Etude des épontes de fractures

Partant de constatations du type de celles faites précédemment, disposant d'un appareillage qui me permettait de doser la radioactivité de petites quantités de matière, j'ai décidé d'étudier en anticoincidence la radioactivité au sein des épontes de fracture en partant de l'éponte (sens strict) pour pénétrer dans la roche saine.

Chacun des échantillons analysés dans cette étude a été préparé de la façon suivante : la roche a été débitée en tranches parallèlement à la

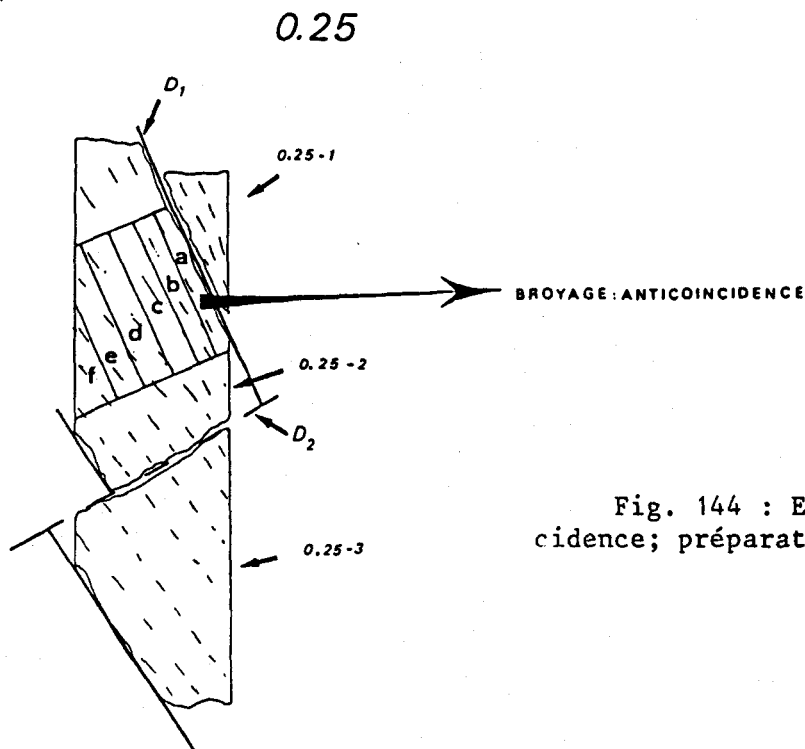


Fig. 144 : Etude en anticoincidence; préparation des échantillons.

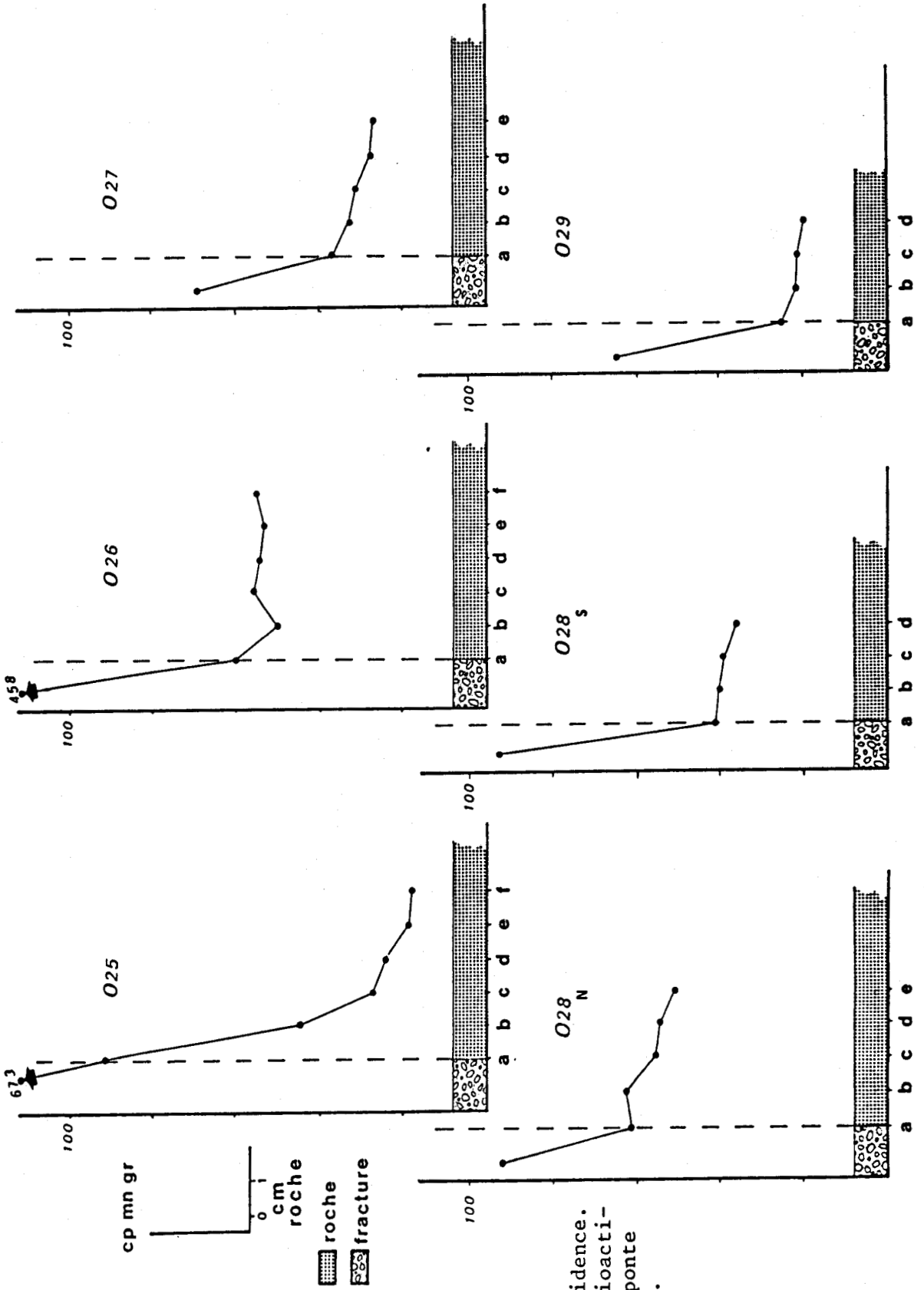


Fig.145 : Anticoïncidence.  
Evolution de la radioactivité à partir de l'éponte au sein de la roche.



fracture (fig.144) et chacun de ces échantillons s'est vu attribuer un index alphabétique (025a, 025b, 025c, 025d ...). Après avoir été débitée chaque fraction rocheuse a été broyée en vue des analyses (anticoïncidence, séparation électromagnétique, dosage du fer ).

Dans un premier temps, j'ai procédé à l'analyse en anticoïncidence dont les résultats sont présentés en figure 145. D'une façon générale, on constate une décroissance à partir de l'éponte (s.s.) en pénétrant dans la roche saine. Ce phénomène peut être rapide (025), hésitant (026) ou assez lent (027, 028 N et S, 029). En tout cas, finalement, le phénomène mis en évidence semble l'être de façon assez comparable à l'autoradiographie. A partir de ces résultats, il semblerait que les remplissages de fractures contaminent la roche.

Les échantillons étudiés présentent tous à l'observation des oxy-hydroxydes de fer épigénétiques, j'ai donc renouvelé l'expérience des remplissages : j'ai séparé à l'aide d'un électro-aimant (séparation Frantz) la fraction limonitique du reste de la roche. Les résultats de l'étude en anticoïncidence sont présentés dans le tableau de la figure 146. De ces chiffres, il ressort nettement que la phase limonitique est plus active que le reste de la roche. Par ailleurs, il apparait que l'activité des oxydes semble indépendante de l'éloignement de l'éponte (s.s.). Au total, il semble établi que la radioactivité des oxydes de fer est forte, mais que leur participation à la masse (% du poids) est rapidement assez faible.

N° échantillons		ACTIVITES (cp/mn/gr)			% POIDS		Um (ppm)
		Roche total	sil.O.S.A	N sil.O.S.A	sil.O.S.A	N sil.O.S.A	
026	F	458	752	316	40	60	366
	a	58	162	14	1	99	
	b	53	159	8	1	99	
	c	53	397	17	1	99	
	d	50	237	16	1	99	
	e	48	427	20	1	99	
028	F	62	72	46	65	35	62
	a	38	216	23	6	94	
	b	37	82	25	13	87	
	c	36	78	31	8	92	
	d	33	88	21	9	91	
029	F	93	919	68	20	80	134.5
	a	22	343	19	2	98	
	b	19	220	16	2	98	
	c	18	228	15	2	98	
	d	17	239	12	1	99	

Fig. 146 : Tableau de résultats des analyses en anticoïncidence sur les épontes de fracture.

5.3.2.2. Etude de la M.O.D.

Suite aux réflexions faites en 3ème partie, Chapitre IV, sur le rôle potentiel de la Matière Organique dans la fixation de l'Uranium, il était intéressant d'analyser en anticoïncidence le produit des séparations par flottation.

Je présente le résultat de ces comptages à la figure 147. Ces particules ne sont pas exemptes de radioactivité, même si les comptages enregistrés ne sont pas exceptionnels. Cependant, il n'y a pas de relation évidente entre la concentration en Um et l'activité de la M.O.D., ni même avec le pourcentage de M.O.D. présente dans ces roches. Pour moi, il semble que l'hypothèse consistant à avancer que chaque grain organique constitue un micro milieu réducteur susceptible de fixer l'Uranium amené par un fluide d'origine supergène est dans le cas de la figure d'Oizy le schéma le plus probable.

5.3.2.3. Conclusions

L'étude de la radioactivité au sein des roches a confirmé l'importance

N°échantillons	% M.O.D.	Activité MOD cp/mn/g	Um ppm
1	2.79	151	7.6
8	4.05	115	2.9
16	4.35	51	52
24	2.93	56	20.9
25	3.40	56	5.4
26	3.20	51	21.80
33	2.98	39	9.9
38	4.94	40	9.4
15	5.53	42	12.1
23	3.17	43	16.2
43-1	2.59	52	44.80
43-2	7.92	51	16.50

Fig. 147 : Résultats des analyses en anticoïncidence de quelques échantillons de M.O.D.

du rôle des oxydes de fer dans la fixation de l'Uranium. Ce dernier est amené au contact des roches par l'intermédiaire du réseau de fractures à remplissage limonitique. L'Uranium paraît se fixer sur ou avec les oxydes de fer et dans une moindre mesure sur la M.O.D.

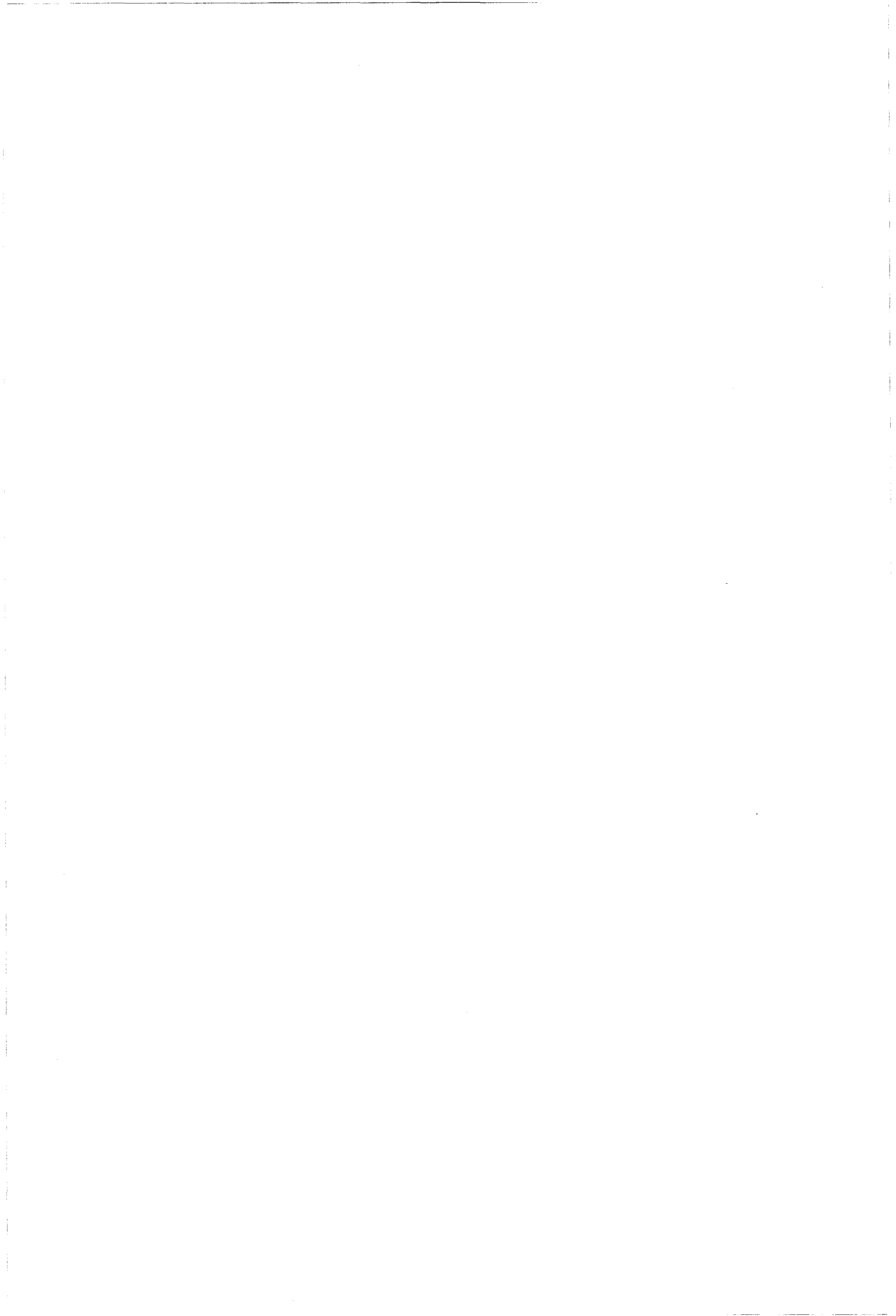
#### 5.4. CONCLUSIONS - ORIENTATION A DONNER AU TRAVAIL

Semblant établie l'importance des oxydes de fer, il me paraît utile de doser le fer total des roches et remplissages de fracture afin de tenter d'affiner la relation fer-uranium. L'importance relative de la matière organique dispersée demanderait que l'on approfondisse son étude, je n'ai pas pu le faire dans le cadre de mon travail.

Le bilan de cette partie de mon étude est double : la liaison oxydes de fer- Uranium est établie à Oizy, et la contamination des roches détritiques du Gédinnien inférieur à Oizy, par des fluides riches en Uranium circulant dans le réseau de fracture paraît plus que probable.

Le fait que l'Uranium ne se soit pas concentré en bordure des pyrites, plaide en faveur de l'hypothèse qui veut que l'oxydation ferrifère du réseau de fracture ait été déjà réalisée lors de la venue des solutions riches en Uranium. Ce dernier se serait alors vu retenu par le fer colloïdal, les minéraux à grande surface spécifique (Lépidocrocite, Illite ...) présents dans les remplissages. Dans la roche, la contamination se serait alors faite à partir de l'éponte sur les mêmes types d'éléments avec en plus un rôle fixateur pour la M.O.D.





# CHAPITRE VI

ETUDES GEOCHIMIQUES : DOSAGE DU FER

DISTRIBUTION DES

RADIOELEMENTS





## CHAPITRE VI.- ETUDES GEOCHIMIQUES

### 6.1. LE DOSAGE DU FER TOTAL

#### 6.1.1. INTRODUCTION

J'ai montré dans ce qui précède (3ème Partie, Chapitre IV et V) l'importance des oxy-hydroxydes de fer et le rôle qu'ils pourraient jouer dans la fixation de l'Uranium responsable des anomalies décrites. J'ai réalisé un dosage du fer total par le bichromate de Potassium (Annexe VII). J'ai titré des remplissages de fractures (15), des roches (54), des épontes de fractures étudiées en anticoïncidence (3) (3ème Partie, Chapitre V).

#### 6.1.2. LES RESULTATS

Tous les titrages ont été faits 2 fois par 2 opérateurs différents afin de mieux tester la répétitivité de la mesure. La précision de celle-ci est de l'ordre de 0,1%.

##### 6.1.2.1. Le titre en fer des remplissages de fracture

Je distingue 3 ensembles dans ce groupe d'analyses (fig.148):

- A. Les remplissages de fracture de la carrière d'Oizy analysés en spectrométrie gamma
- B. Les autres remplissages analysés en spectrométrie gamma
- C. Les remplissages de fracture non analysés en spectrométrie gamma

Il faut ajouter que les échantillons ont été analysés en anticoïncidence.

Les teneurs en fer obtenues varient de 3,5 % à 32,39%. J'explique cet écart par la variation du taux de lessivage et par celle de la "pollution" par la couverture récente (altérites quaternaires). Ceci est particulièrement sensible dans le groupe C : la fracture 033 est étroite, peu aisée à échantillonner et donc bien protégée de la pollution et à moindre échelle du lessivage : elle contient 28,47 % de fer.



Les fractures ROB 31 et 35 sont, par leur situation (talus de la R.O.B.) exposées à un lessivage actuel actif, à une forte pollution par la couverture superficielle. Elles contiennent respectivement 3,57 % et 9,18 % de Fer.

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	FER %
PAF 024	o 24 f	25,3
025	o 25 f	27,46
026	o 26 f	25,7
027	o 27 f	4,18
028	o 28 f	4,54
029	o 29 f	24,88
030	o 30 f	3,86
031	o 31 f	16,27
032	o 32 f	9,65
038	o 38 f	13,06

(A)

N° TERRAIN	FER %
ROB 31	3,57
35	9,18
o 38	28,47

(C)

Fig. 148 : Dosage du Fer total : résultats des analyses de remplissages de fractures - Légende dans le texte.

N° ORDINATEUR	N° TERRAIN	FER %
PAF 040	COO 5	32,39
041	BF1 F	16,25

(B)

Dans le groupe B, les teneurs en fer sont élevées, les fractures sont dans la roche saine et bien protégées.

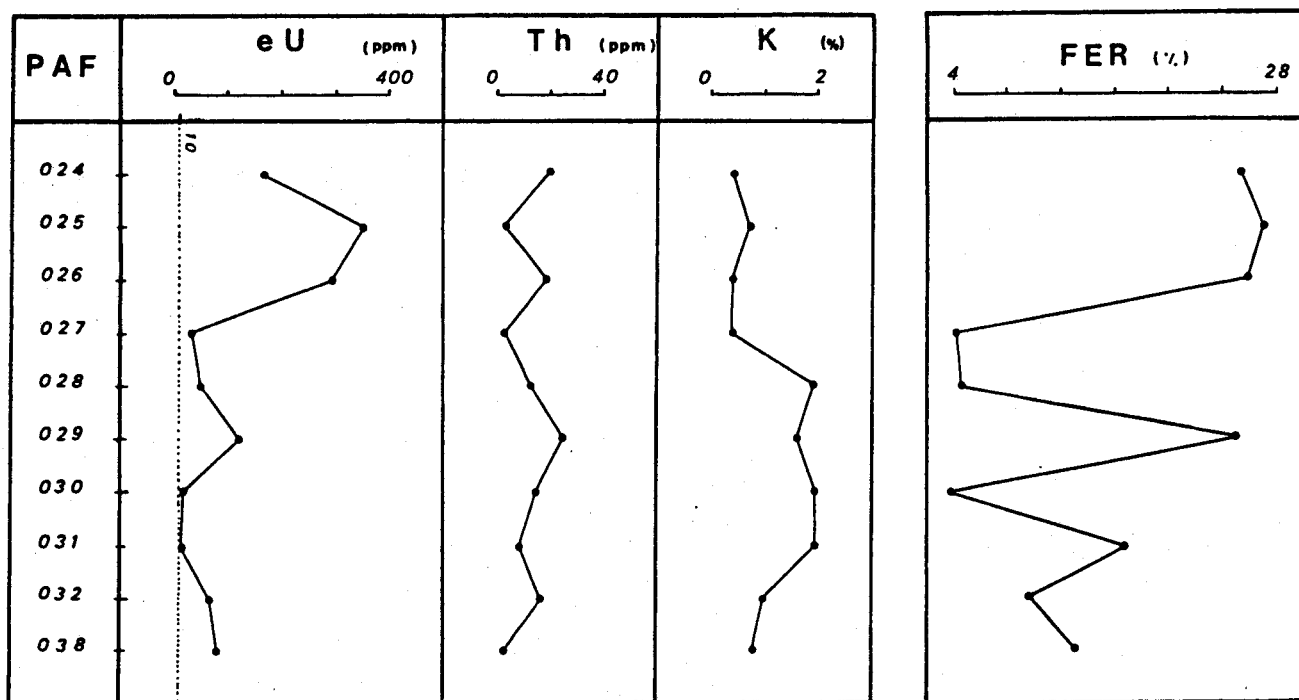


Fig. 149 : Comparaison des teneurs en radioéléments et de la teneur en Fer des remplissages de fracture du groupe A .

Le groupe A présente tous les cas de figure. Il est le plus intéressant à étudier. Les échantillons 27, 28, 30 se présentent à l'analyse comme sur le terrain les plus pauvres en Uranium. Ils sont plus riches en débris lithiques et éléments de la couverture superficielle. D'un point de vue morphologique, elles sont toutes trois largement ouvertes, ce qui a permis les pollutions signalées. Les sept autres échantillons de ce groupe montrent des teneurs assez élevées en fer (9,65 à 27,46 %).

Si on se reporte à la figure 149, il est relativement clair que les variations des teneurs en fer accompagnent assez bien celles de la concentration en Uranium.

#### 6.1.2.2. La teneur en fer des roches

54 échantillons des 2 coupes étudiées ont été titrés. Les résultats sont présentés dans les tableaux de la fig. 150. Les teneurs varient de 1,87 à 5,21 % de fer. Ceci correspond à des valeurs normales. En effet, la moyenne des concentrations sur l'ensemble des échantillons de roche est de 3,40 %. GRANIER (1973) donne 3,33 % comme teneur de fond pour le fer dans les roches sédimentaires.

En figure 151, je présente l'évolution des teneurs en fer des roches

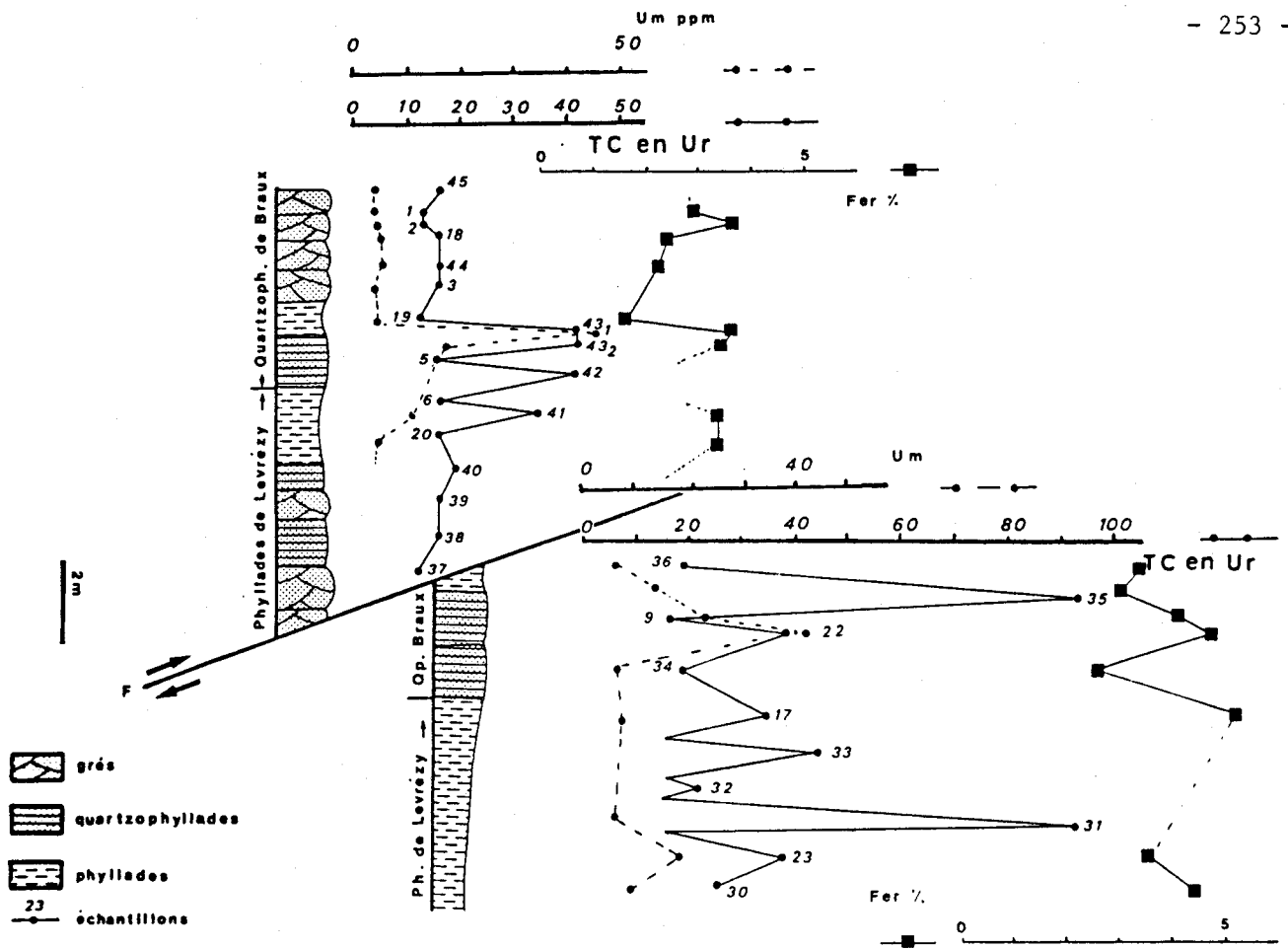
N° ORDINAT.	N° TERRAIN	FER %
PAO 001	0 1	1,87
002	2	4,04
003	3	2,9
005	5	4,12
006	6	3,77
007	7	2,12
008	8	2,82
009	9	3,2
010	10	3,34
011	11	4,13
012	12	3,72
013	13	4,01
014	14	2,67
015	15	4,14
016	16	3,38
017	17	3,99
018	18	3,74
021	21	4,29
022	22	3,72
023	23	4,01
024	24 <sub>r</sub>	3,54
025	25 <sub>r</sub>	2,65
026	26 <sub>r</sub>	3,14
027	27 <sub>r</sub>	4,18
028	28 <sub>rs</sub>	3,62
029	29 <sub>rs</sub>	2,07
030	30 <sub>r</sub>	3,26
031	31 <sub>r</sub>	3,82
032	32 <sub>r</sub>	2,93
033	33	2,92
035	35	3,29
038	38 <sub>r</sub>	3,97
042	28 <sub>rn</sub>	3,4
043	29 <sub>rn</sub>	2,35

N° ORDINAT.	N° TERRAIN	FER %
PAO 045	ROB 17	5,21
046	1	2,9
047	2	3,59
049	8	3,05
050	9	4,12
052	15	3,85
053	18	2,45
054	19	1,65
055	20	3,43
056	21	4,11
057	22	4,64
058	23	3,57
059	30	4,38
061	34	2,53
062	35	3,02
063	36	3,36
064	43	3,50
065	43	3,63
066	44	2,28
068	41	3,37

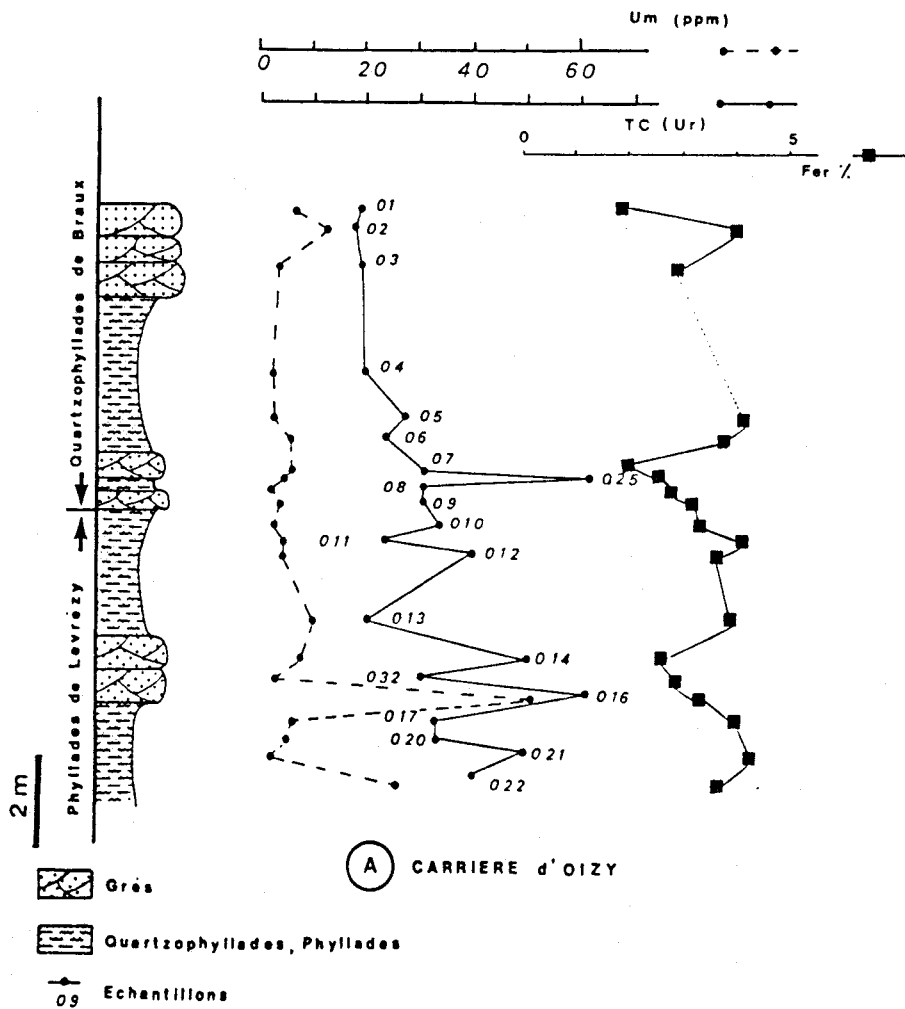
Fig. 150 : Résultats des dosages du Fer total (34 échantillons de la carrière, 20 échantillons de la R.O.B.).

Fig. 151 : Evolution des teneurs en fer dans les coupes de la carrière (A) et de la R.O.B. (B).





(B) ROB



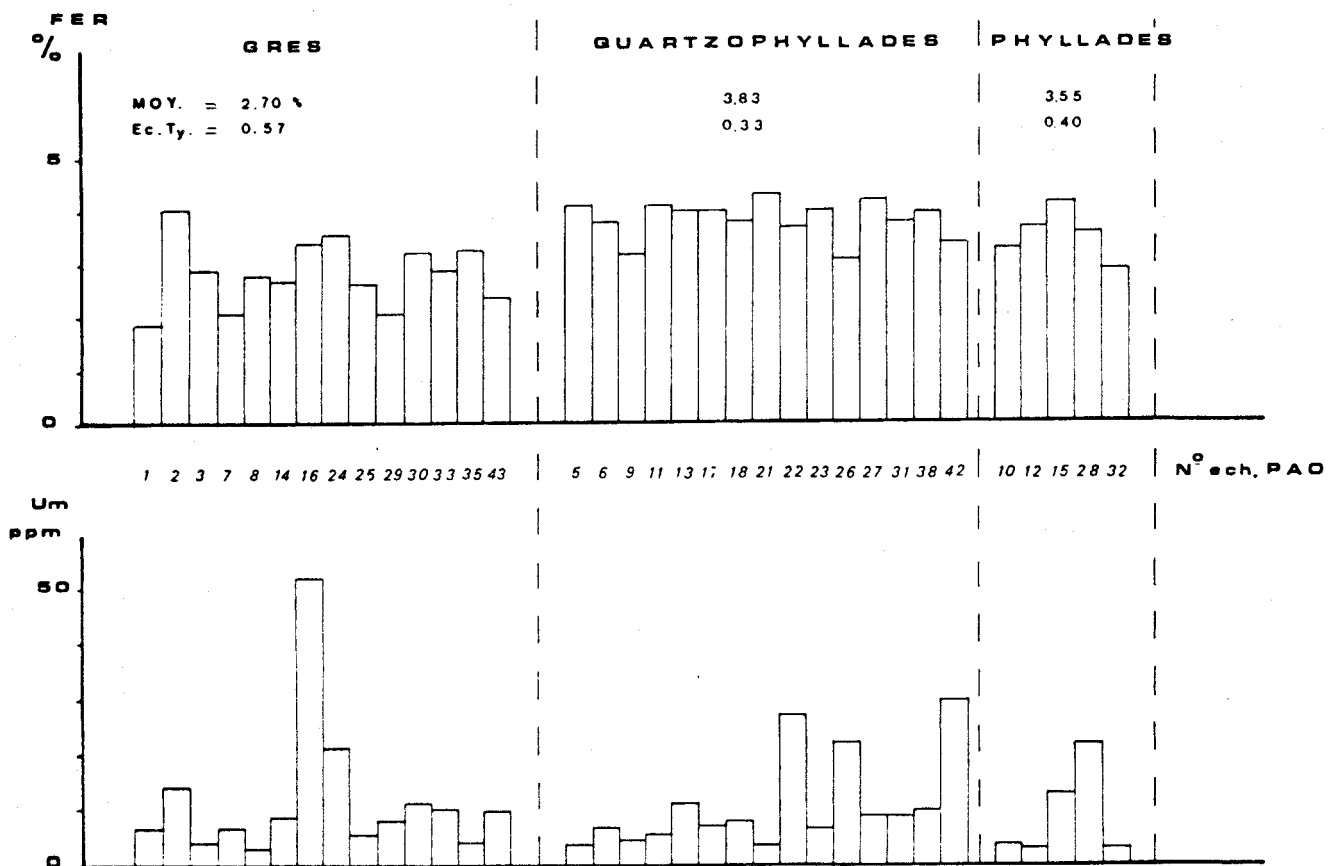
(A) CARRIERE d'OIZY

au long des coupes de la R.O.B. et de la carrière d'Oizy. Il n'apparaît pas à la lecture de ces figures qu'il y ait une évolution parallèle des teneurs en Fer et en Uranium directement perceptible.

Par ailleurs, j'ai étudié les teneurs en fer des différents faciès (dans la carrière d'Oizy). Là non plus il ne semble pas qu'il y ait de liaisons facilement visualisables. On peut noter que les échantillons les plus riches en fer sont les quartzophyllades, puis les phyllades et enfin les grès (fig. 152). Les écarts à la moyenne les plus forts sont enregistrés sur ce dernier faciès. Les concentrations en Fer des quartzophyllades et phyllades sont plus stables.

Si on pose le fait que les oxydes et hydroxydes de fer sont épigénétiques, liés à l'altération, il semble donc que les quartzophyllades et phyllades soient plus sensibles à ce phénomène que les grès. Ces derniers ont des ciments plus ou moins argileux, ce qui peut expliquer leur plus ou moins grande sensibilité à l'altération et leur concentration moyenne en fer à la fois plus faible et plus hétérogène (dispersion autour de la moyenne plus grande). Le fer des grès est le plus souvent, d'après les observations microscopiques, associé à une microfracturation.

Fig. 152 : Teneurs en Fer et Uranium des échantillons de la carrière d'Oizy - Distinction des faciès.



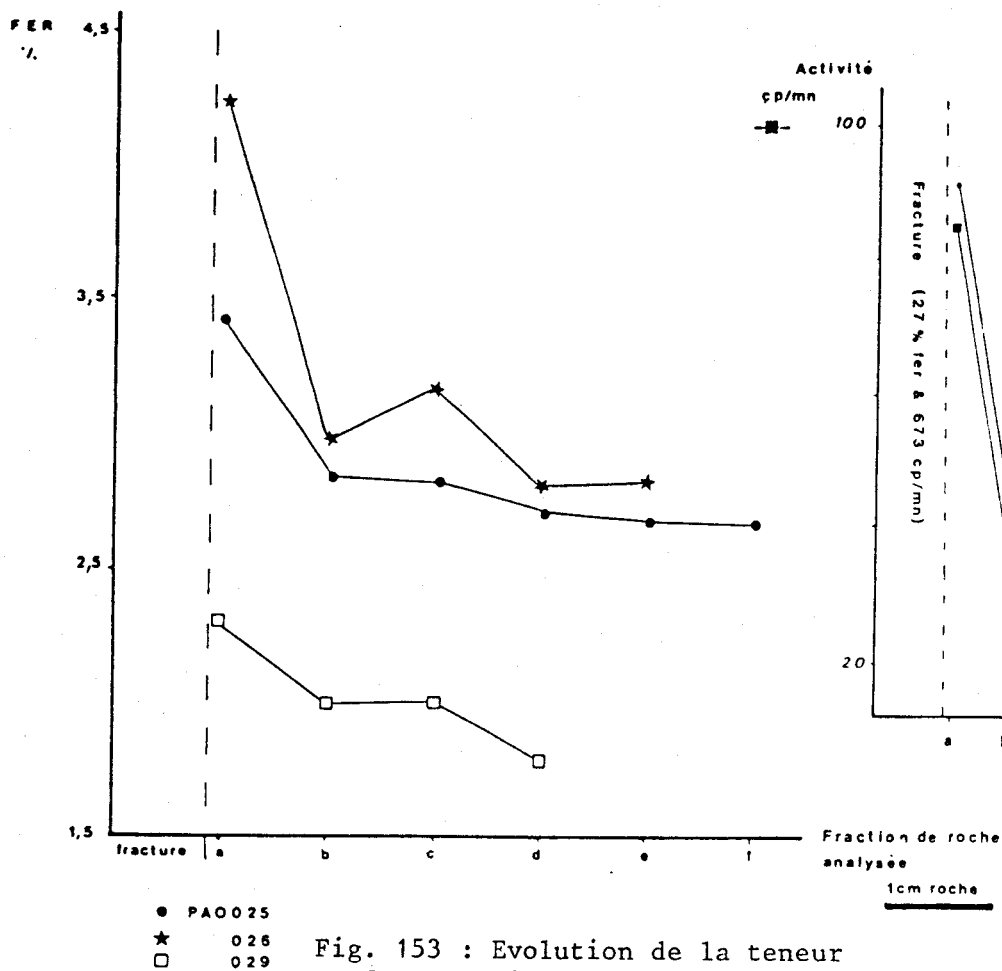


Fig. 153 : Evolution de la teneur en fer au sein des épontes de fractures

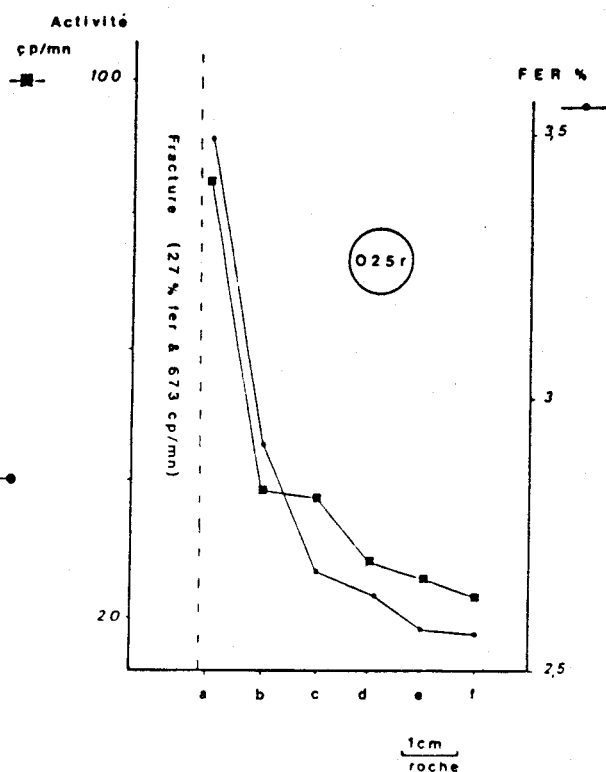
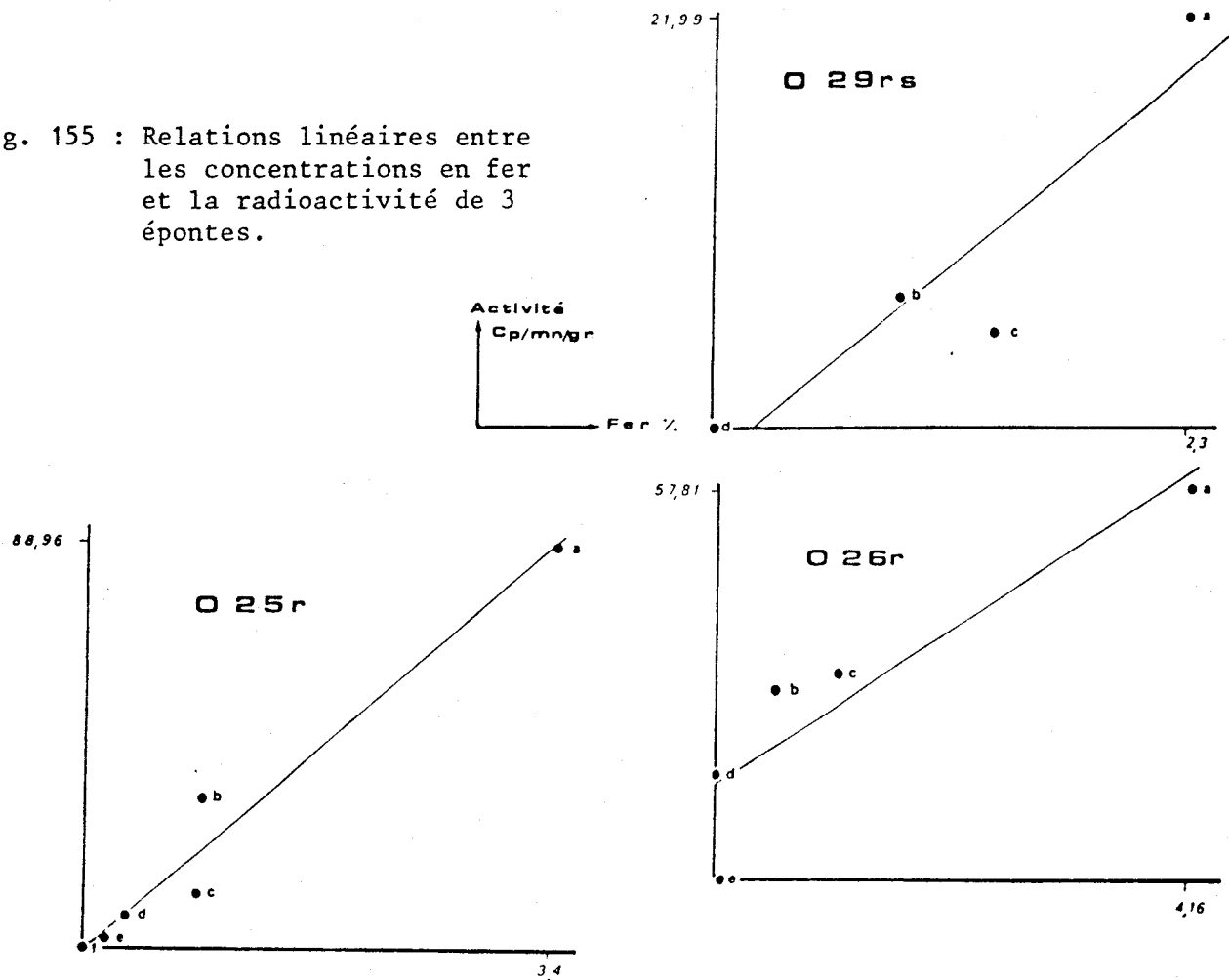


Fig. 154 : Comparaison entre les résultats de l'anticoïncidence et le dosage du fer (P.A.F.025).

Fig. 155 : Relations linéaires entre les concentrations en fer et la radioactivité de 3 épontes.



Par ailleurs, les roches étudiées peuvent, indépendamment de leur faciès, être séparées en deux groupes :

- les roches saines,
- les épontes de fractures et roches de zones broyées.

Le second groupe est celui où figurent les roches les plus riches en Uranium et en fer.

#### 6.1.2.3. L'étude du fer dans les épontes

J'ai présenté au Chapitre V de cette troisième partie, l'étude en anticoincidence des épontes de fractures. Divers faits me donnant à penser que le fer et l'Uranium ont une distribution commune, j'ai dosé le fer dans trois épontes selon le fractionnement établi pour l'anticoincidence. J'ai ainsi analysé les épontes 025, 026, 029. La figure 153 illustre les résultats obtenus : la concentration en fer décroît à partir de l'éponte (s.s.) des fractures. Ce comportement est similaire à celui de la radioactivité dans ces mêmes échantillons (3ème partie, Chapitre 5). En figure 154, j'ai mis en parallèle, dans un exemple, les 2 courbes de décroissance : elles évoluent bien dans le même sens. Il me paraît possible, au moins dans ce cas, d'affirmer que le fer et l'Uranium ont les mêmes comportements. En figure 155, je présente les relations linéaires établies pour les trois séries d'échantillons. Il semble donc que l'activité des échantillons est ici fonction de la teneur en fer (les coefficients de corrélation sont tous supérieur à 0,8).

#### 6.1.3. CONCLUSIONS - RELATIONS FER-URANIUM

Il était nécessaire à partir des observations qui précèdent d'établir la relation  $U_m = f(\text{Fer})$  (fig. 156). Dans un premier temps, je l'ai établie pour l'ensemble des échantillons analysés en spectrométrie gamma et dont le titre en fer est connu. Le coefficient de corrélation  $R = 0,806$  obtenu est bon. Il est à noter que les remplissages de fractures se distinguent aisément (petits carrés) aussi, j'ai établi cette relation pour les seuls sédiments ferrifères (échantillons de la carrière d'Oizy). Le coefficient  $R = 0,67$  est moins bon que précédemment (fig. 156) mais reste significatif.

L'existence d'une relation directe entre le fer et l'Uranium me paraît plus que probable, les valeurs des coefficients de corrélation peuvent s'expliquer simplement. Si de l'Uranium est présent lors de la précipitation des oxy-hydroxydes de fer (3ème partie, Chapitre IV), il n'intégrera aux structures cristallines ou aux minéraux amorphes. Mais si lors de cette précipitation (d'origine supergène), localement, peu ou pas d'Uranium n'est présent, il ne pourra évidemment pas accompagner



ces oxydes. Ceci explique la dispersion des points de la figure 156.

Les résultats obtenus restent en accord avec les travaux de nombreux auteurs. Je citerai par exemple les travaux de DAHL *et al.*, 1974; GUILLET *et al.*, 1976; MICHEL, 1981; GUENIOT *et al.*, 1982, les deux derniers donnant de beaux exemples de distributions et comportements communs du fer et de l'Uranium dans les concentrations ferrifères.

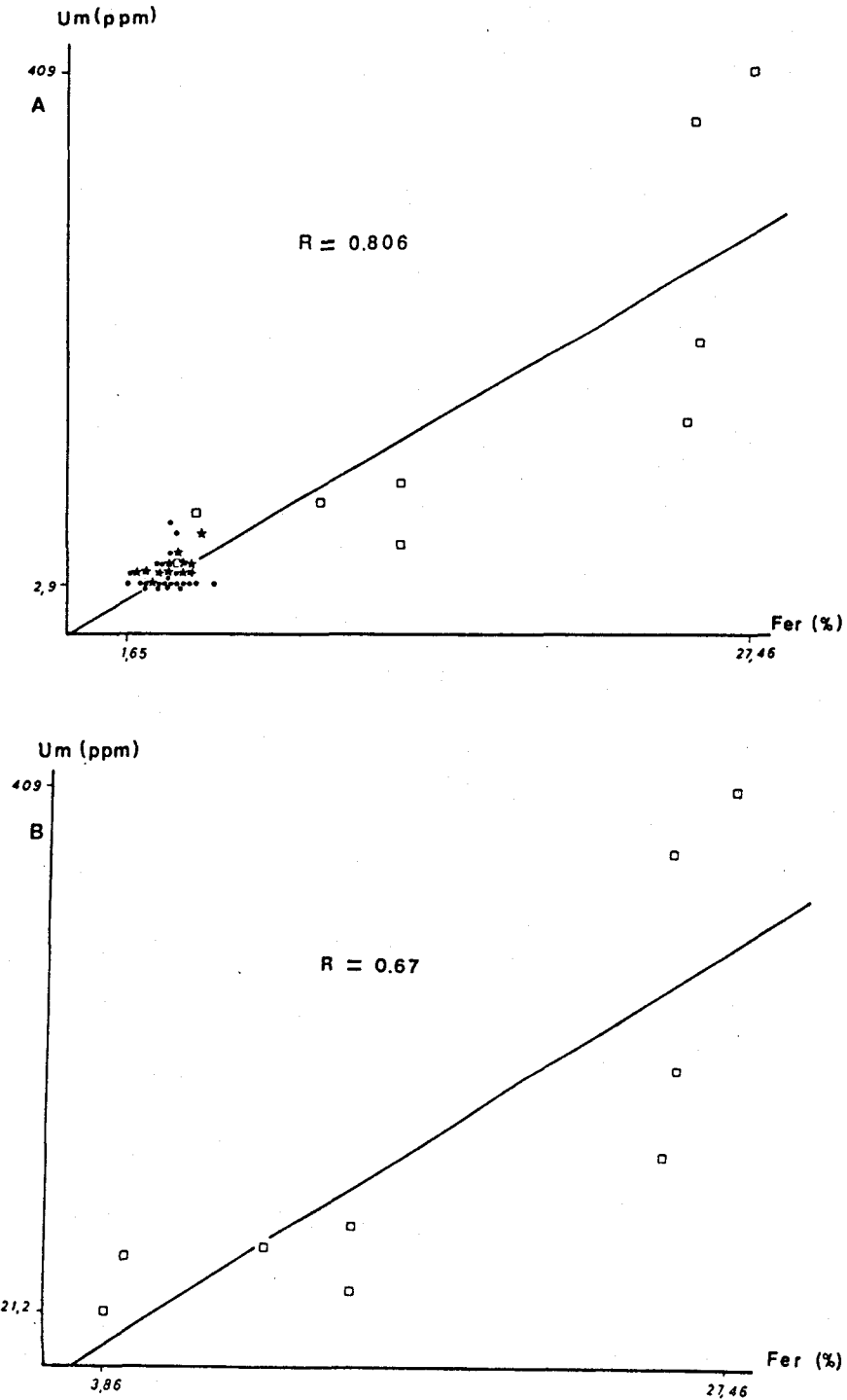


Fig. 156 : Relation Fer - Uranium : A. pour l'ensemble des échantillons B. pour les remplissages de fractures de la carrière d'Oizy.

## 6.2. ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES RADIOELEMENTS

### 6.2.1. INTRODUCTION

Cette analyse comporte trois volets. En effet, j'y étudie trois types d'échantillons différents dans leur composition et dans leur origine :

- des alluvions,
- des remplissages limonitiques de fracture,
- des roches du Gédinnien inférieur.

Avant de considérer les relations entre l'Uranium, le Thorium, le Potassium et les différents faciès étudiés, je rappellerai brièvement les grands traits du comportement géochimique de ces radioéléments. Je ne reviens pas sur le comportement de l'Uranium qui a été traité en première partie, Chapitre II.

Du fait de la faible mobilité du Thorium, de la grande stabilité de la majorité des minéraux thorifères, cet élément transite, dans le cycle sédimentaire, soit intégré au réseau cristallin de minéraux lourds, soit adsorbé sur les argiles (PLILER *et al*, 1962b; LANGMUIR *et al*, 1980). Par conséquent, le Thorium est caractéristique de la fraction détritique des sédiments (SERRA, 1979).

Très répandu sous forme de sels ( $KCl$ ,  $K_2SO_4$ , ...), le Potassium est à l'origine fréquent dans les évaporites, on le rencontre également dans certains silicates (micas, feldspaths alcalins). En solution, en présence des particules fines des sédiments, il est facilement adsorbé par certains minéraux argileux (HASSAN *et al*, 1975).

Les différences de comportement géochimique des trois radioéléments étudiés permettent de les utiliser comme marqueur des divers types de phénomènes sédimentaires (QUINIF *et al*, 1982).

### 6.2.2. PRESENTATION DU PRINCIPE DE L'ANALYSE DES FACIES PAR LES DIAGRAMMES

#### T-U-K.

Dans la littérature, la caractérisation des faciès à partir du comportement géochimique des radioéléments est souvent abordée (ADAMS *et al*, 1958; MURRAY *et al*, 1958; PLILER *et al*, 1962 a et b; DYPUIK *et al*, 1984). En 1982, QUINIF, CHARLET, DUPUIS ont proposé une nouvelle méthode de caractérisation des faciès sédimentaires basée sur le comportement géochimique de U-Th et K. Leurs observations ont porté sur les sédiments paléozoïques et cénozoïques

de Belgique. Je présente rapidement leur méthode d'analyse dans ce qui suit avant de passer à son application.

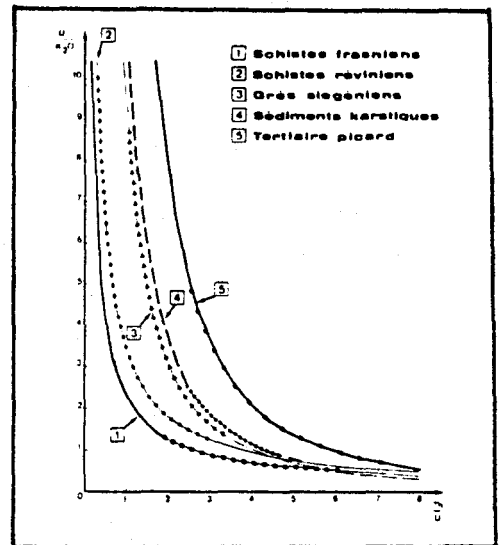
### 6.2.2.1. Les diagrammes Th/U - U/K<sub>2</sub>O

Ces auteurs démontrent dans leur étude que les roches et sédiments détritiques, caractérisés par la présence de U-Th-K obéissent à la loi (1) :

$$U/K_2O = a (Th/U)^b \quad (1)$$

Cette équation est celle d'un hyperboloïde de la forme  $y = ax^b$ , asymptotique à l'infini pour  $x = 0$  (fig.157).

Fig. 157 : Diverses courbes porteuses en diagrammes Th/U - U/K<sub>2</sub>O (in Quinif et al., 1982).



Les coefficients "a" et "b" caractérisent la relation (1) et sont spécifiques de chaque faciès. La signification physique du coefficient "a" peut être dégagée en remarquant que :

$$U/K_2O = a \text{ si } Th/U = 1 \quad (\text{QUINIF et al., 1982})$$

Il exprime la manière dont varient l'Uranium et le Thorium par rapport au Potassium. Plus "a" est grand, plus l'Uranium a de poids devant le Potassium.

La signification physique du coefficient "b" prend son sens lorsque l'on considère tout d'abord la valeur particulière  $b = -1$ . L'équation (1) devient alors  $Th = a (K_2O)$  (QUINIF et al., 1982). L'Uranium est alors indépendant des deux autres radioéléments, le Thorium et le Potassium étant corrélés linéairement.

D'après ces auteurs, le rapport  $Th/K_2O$  apparaît comme une caractéristique du milieu par sa valeur et ses variations au sein d'un ensemble ou séquence détritique. Le coefficient "b" illustre donc l'indépendance de l'Uranium par rapport au Thorium et au Potassium.

Litho-faciès	U/K <sub>2</sub> O = a(Th/U) <sup>b</sup>			Th = c(K <sub>2</sub> O) + d		
	a	b	R	c	d	R
Schistes révinien	3,47	-0,93	0,90	2,16	6,11	0,03
Grès siegéniens	9,54	-1,63	0,90	3,49	2,94	0,91
Schistes franiens	2,32	-0,85	0,96	2,36	2,02	0,86
Tertiaire picard	28,5	-1,90	0,94	2,65	5,56	0,69
Sédiments karstiques	11,4	-1,65	0,87	1,36	8,18	0,12

Fig. 158 : Valeurs des coefficients a,b,c et d des courbes porteuses de la figure 157 (d'après Quinif et al. 1982).

#### 6.2.2.2. Diagramme Th-K<sub>2</sub>O

Selon QUINIF *et al* (1982), les faciès détritiques obéissent à une autre loi (2) qui est cependant moins générale que la précédente :

$$\text{Th} = C \text{K}_2\text{O} + d \quad (2)$$

Cette relation est une expression d'une propriété géochimique de certaines argiles. MERCIER *et al* (1982) indiquent à partir de travaux sur les argiles et silt du Landénien, de l'Yprésien et du Rupélien de Belgique, que cette relation est d'autant meilleure que les argiles contiennent plus d'Illite et de Smectite. Du point de vue des mécanismes, le Potassium est bloqué dans les structures cristallines, le Thorium, insoluble, est véhiculé adsorbé sur les minéraux argileux. Cette relation est détruite si les sédiments sont exposés à une pédogenèse intense, elle sera respectée dans le cas d'un lessivage ménagé des bases alcalines en pédogenèse peu intense. L'ordonnée à l'origine de la relation (2) traduit la part du Thorium indépendante du Potassium.

L'analyse de ces deux équations (1) et (2) conduit à classer les roches détritiques selon : leur nature, l'origine de leurs minéraux, leur mode de dépôt, les conditions physico-chimiques de leur sédimentation.

Les courbes porteuses d'équation  $U/K_2O = a (Th/U)^b$  définissent les faciès. Les auteurs ont présenté quatre familles de faciès géochimique selon une simple transformation de cette équation (fig. 159).

- faciès I (rapport  $\text{Th}/\text{K}_2\text{O}$  constant) : sédiment de type pélite, argile ( $b = -1$ )
- faciès II : grès et sédiments détritiques fluviatiles ou estuariens
- faciès IIIa ( $0 < b < 1$ ) : les schistes normaux et faiblement anormaux en

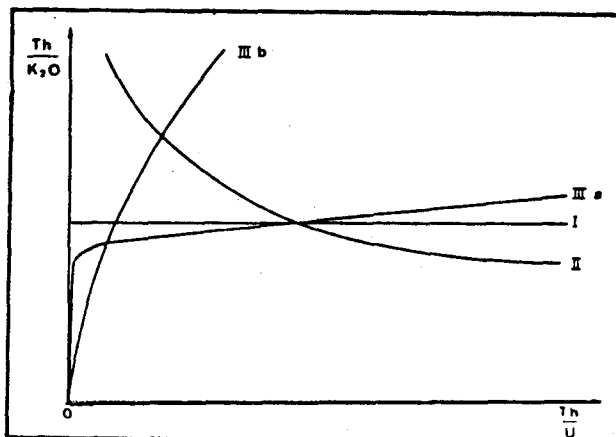


Fig. 159 : Allure des courbes porteuses dans le diagramme  $\text{Th}/\text{U} - \text{Th}/\text{K}_2\text{O}$ . I, II, IIIa et IIIb constituent les types explicités dans le texte (d'après Quinié et al. 1982).

Uranium de la période pré-Carbonifère du bassin de Dinant appartiennent à ce faciès;

- faciès IIIb ( $b < 0,5$ ) : les faciès à sédimentation chimique dominante (silicification, phosphatogénèse) tels ceux des schistes anormaux du Viséen-Namurien du bassin de Dinant (M. NDZIBA, 1982) sont de ce type.

A partir de cette méthode d'interprétation, je vais maintenant analyser et discuter des résultats obtenus en spectrométrie gamma au cours de mon étude.

### 6.2.3. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX ALLUVIONS (SEDIMENTS DE COUVERTURE) (P.A.L.)

Parallèlement au dosage du Radon des sources, un certain nombre d'échantillons (16) de sédiments récents prélevés au droit des sources ont été

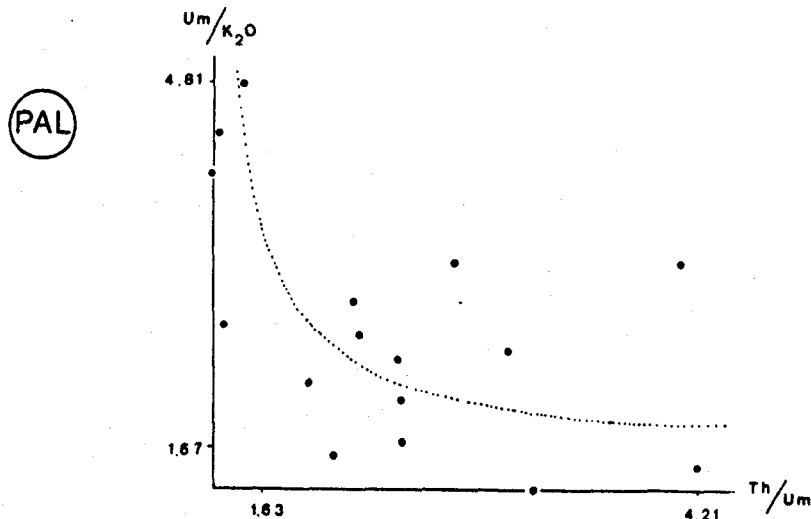


Fig. 160 : Diagramme  $\text{U}_{\text{m}}/\text{K}_2\text{O} - \text{Th}/\text{U}_{\text{m}}$  des échantillons d'alluvions.

PAL

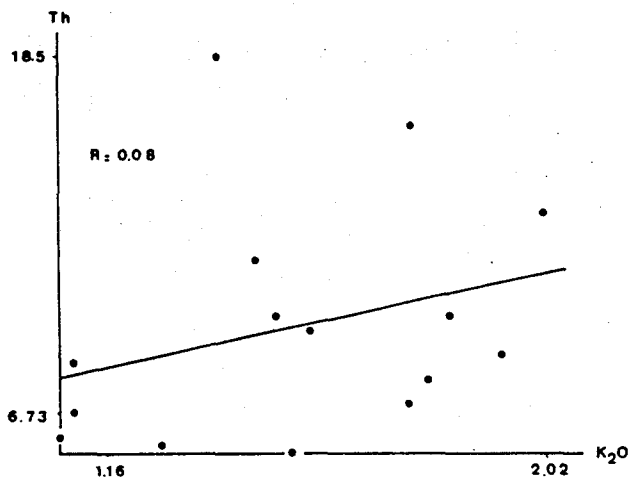
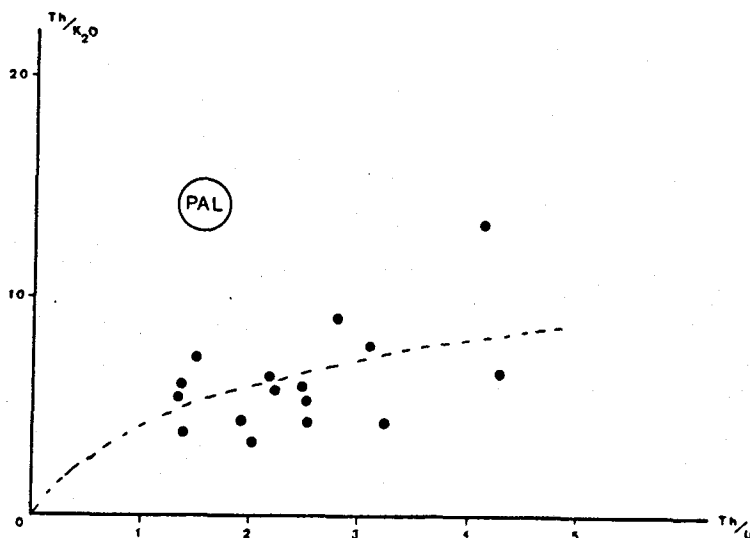


Fig. 161 : Diagramme Th - K<sub>2</sub>O des échantillons d'alluvions.

Fig. 162 : Diagramme Th/K<sub>2</sub>O des échantillons d'alluvions.



analysés en spectrométrie gamma (3ème partie, Chapitre II, paragraphe 2.1.3.4.). Les teneurs en Uranium relevées ne semblent pas responsables des anomalies en Radon, même si parfois elles sont un peu fortes pour ce type de sédiment. L'analyse en diagramme T-U-K n'apporte que peu de renseignements (fig. 160, 161 et 162 ). Les coefficients de corrélation sont mauvais. Il semblerait que le lessivage plio-quaternaire perturbe complètement la répartition des radioéléments qui ne sont de ce fait pas caractérisables par ces diagrammes.

Cependant, le diagramme Th/K<sub>2</sub>O-Th/U paraît mettre en évidence l'appartenance de ces échantillons au faciès III (QUINIF, 1982). Ceci est probablement dû au fait que la couverture plioquaternaire est d'une part riche en débris lithiques schisteux provenant du substrat, et d'autre part, riche en limon constitué en partie d'un matériel argileux de l'altération.

6.2.4. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX REMPLISSAGES DE FRACTURE (P.A.F.)

6.2.4.1. Le diagramme U/K<sub>2</sub>O - Th/U

La représentation des échantillons P.A.F. dans le diagramme U/K<sub>2</sub>O-Th/U montre qu'ils obéissent à la loi (1) précédemment définie (fig. 164).

FACIES	a	b	R	c	d	R
P A L	11,514	- 0,582	0,311	3,647	3,838	0,084
P A F	17,631	- 0,878	0,716	1,164	11,295	0,015
P A O	5,019	- 0,961	0,860	1,555	7,289	0,445
Epones	4,745	- 0,969	0,931	1,827	5,980	0,615
Grès	7,580	- 0,877	0,796	5,714	0,300	0,308
Quartzophyl.	3,974	- 1,027	0,949	3,064	2,516	0,583
Phyllades	4,179	- 1,003	0,973	7,936	11,052	0,042

Fig. 163 : Valeur des coefficients a,b,c,d et coefficient de corrélation des courbes porteuses des échantillons analysés en diagramme Th - U - K .

L'hyperboloïde représentative de ces échantillons est la suivante :

$$U/K_2O = 17,631 (Th/U) - 0,878$$

Le coefficient de corrélation (fig.163) est significatif, la loi est donc vérifiée, au moins partiellement. La représentation logarithmique, qui permet le calcul des coefficients a et b, de cette relation (fig. ) montre comme la précédente une assez grande dispersion de points. Il ne semble pas y avoir de groupement particulier. Le coefficient "b"(-0.878)est assez voisin de -1, ce qui traduit l'indépendance de l'Uranium par rapport au Thorium et au Potassium.

Il semble donc d'une part que l'Uranium est à considérer indépendamment des autres radioéléments, que d'autre part, les fortes concentrations enregistrées perturbent, au moins partiellement, la loi exponentielle caractéristique des faciès détritiques. Il se peut que l'altération induite par le lessivage subactuel ait aussi un rôle dans cette dispersion.

Si on considère le coefficient "a", on note qu'il est élevé (a =17,631) traduisant le poids toujours important de l'Uranium par rapport au Potassium. Ce fait est peut être à mettre en relation avec la présence de kaolinite au sein des minéraux argileux.



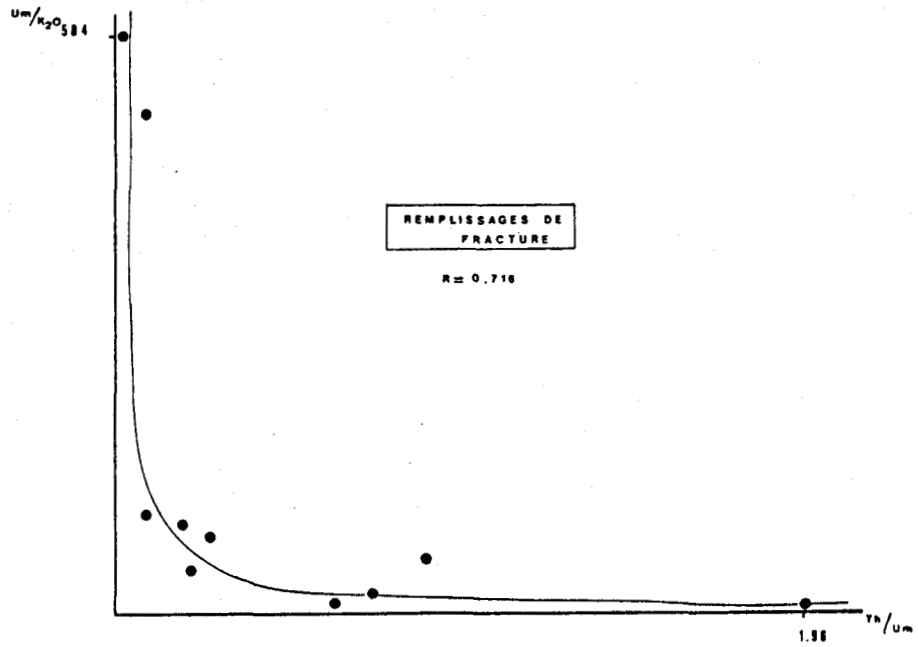


Fig. 164 : Diagramme  $Th/U_m - U_m/K_2O$  des échantillons de remplissages de fractures.

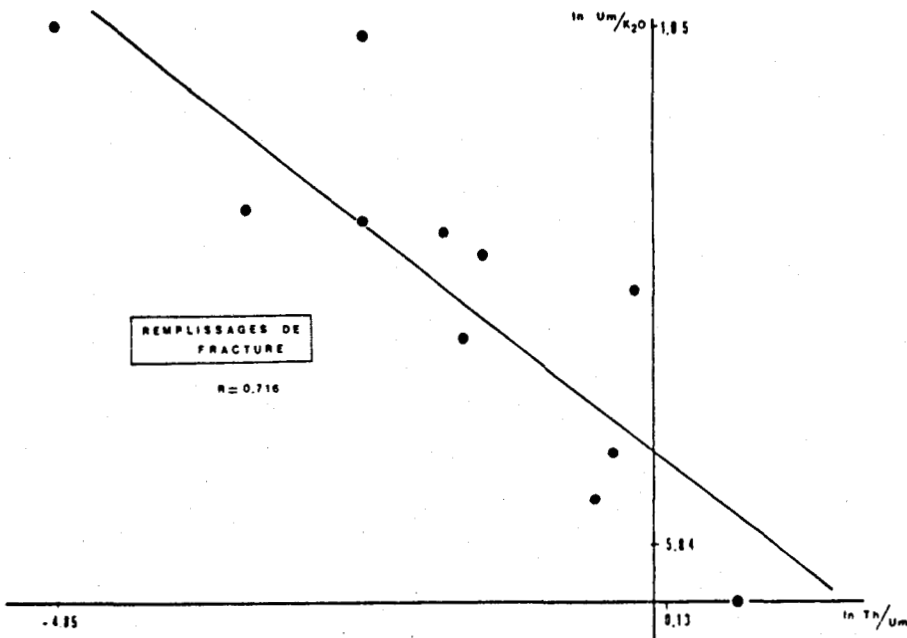


Fig. 165 : Diagramme  $\ln Th/U_m - \ln U_m/K_2O$  des échantillons de remplissages de fracture.

### 6.2.4.2. Le diagramme Th-K<sub>2</sub>O

On vient de voir que le coefficient "b" est voisin de -1, ceci tend à nous rapprocher de conditions où la loi (1) devient :  $Th = a K_2O$ . Le plus souvent dans ce cas, la seconde loi ( $Th = CK_2O + d$ ) est vérifiée et livre des bons coefficients de corrélation. Si on se reporte au tableau de la figure 163 ou au diagramme de la figure 166 on constate que dans le cas qui nous intéresse il n'y a pas de corrélation entre ces deux éléments. Les teneurs en K<sub>2</sub>O étant faibles et sa mobilité bien connue, il semble que cette absence de corrélation confirme l'hypothèse précédemment avancée. Un lessivage subactuel (plioquaternaire) peut avoir solubilisé le Potassium et l'avoir entraîné vers le bas des fractures, ainsi que d'autres éléments facilement solubles (tel le U<sup>6+</sup>).

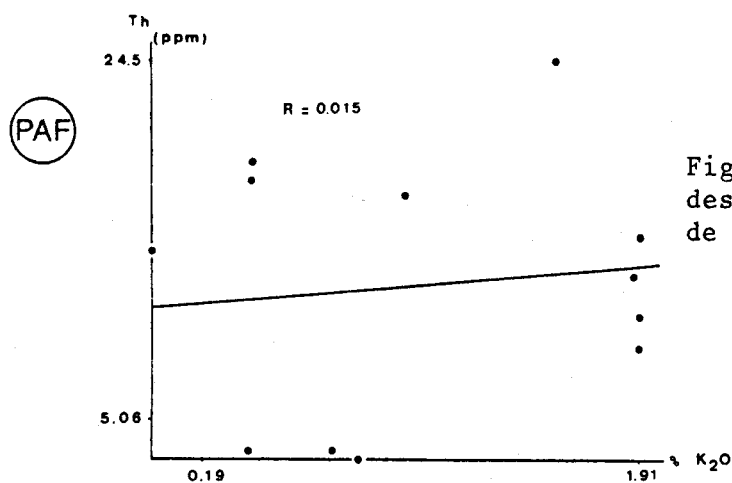


Fig. 166 : Diagramme Th - K<sub>2</sub>O des échantillons de remplissages de fractures.

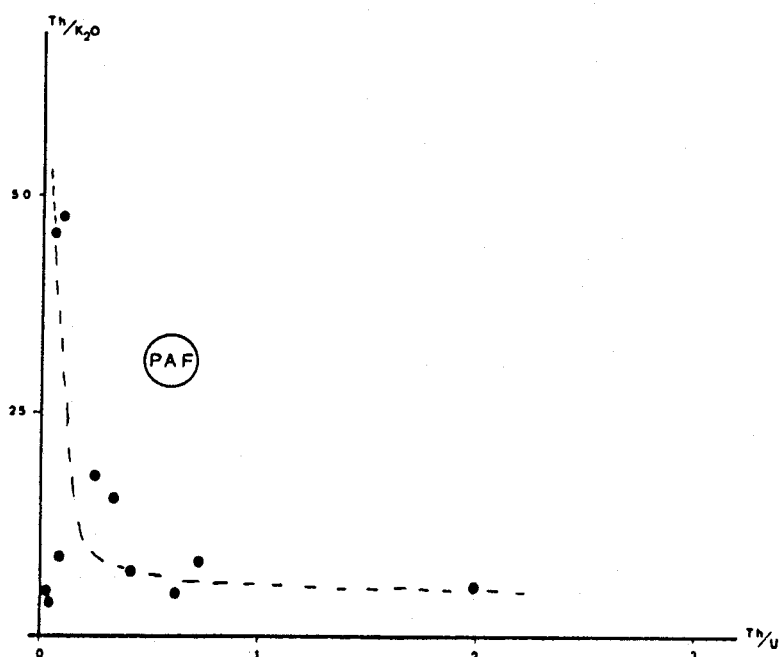


Fig. 167 : Diagramme Th/K<sub>2</sub>O - Th/U, mise en évidence de l'appartenance des P.A.F. au faciès II défini par Quinif *et al.* (1982).

### 6.2.4.3. Le diagramme Th/K<sub>2</sub>O-Th/U

Ce diagramme (fig.167) met en évidence l'appartenance des remplissages de fracture au faciès II défini par QUINIF *et al* (1982). On peut expliquer la forme de la courbe par le fait que ce sédiment est très pauvre en Potassium et que les teneurs en Uranium ont un poids important sur le rapport Th/U. Ceci peut conforter l'hypothèse qui donne un rôle actif au lessivage plioquaternaire auquel ont été soumis ces remplissages.

### 6.2.5. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX SEDIMENTS DU GEDINNIEN INFERIEUR

#### 6.2.5.1. Introduction

Dans un premier temps, j'ai considéré l'ensemble des échantillons. Dans un second temps, j'ai distingué les faciès suivants : grès, quartzophyllades, phyllades, épontes de fracture afin de tenter de dégager des différences de comportement entre ces différents ensembles. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau de la figure 163.

#### 6.2.5.2. Analyse de l'ensemble des échantillons

La loi (1) s'écrit dans le cas présent :

$$U/K_2O = 5,019 (Th/U)^{-0,961}.$$

Si on considère les figures 168 et 169, il ne semble pas qu'il y ait des groupements particuliers de points. Leur relative dispersion, traduite par un coefficient de corrélation ( $R = 0,860$ ) significatif mais pas excellent, permet de penser qu'il existe plusieurs familles de points qui se répartissent sur des courbes parallèles.

On notera que les échantillons les plus anormaux se situent vers les grandes valeurs de U/K<sub>2</sub>O (U/K<sub>2</sub>O maximum est de 26), moins fortes cependant que pour les remplissages (U/K<sub>2</sub>O maximum = 584). Il faut remarquer que les épontes font en majorité partie de ces points "tirés" vers les fortes ordonnées (fig.168). Cette tendance se maintient dans la représentation logarithmique (fig.169). Le coefficient "b" (-0,961) est proche de -1 montrant l'indépendance de l'Uranium vis-à-vis du Thorium et du Potassium.

#### Diagramme Th-K<sub>2</sub>O

Le fait que le coefficient "b" soit proche de -1 implique que la relation (1) devient  $Th = a K_2O$  et que la loi (2), souvent vérifiée libre de bons coefficients de corrélation. Il est net (fig.163,170) que ce n'est pas le cas. On peut trouver deux explications à ce fait :

Fig. 168 : Diagramme Th/Um - Um/K<sub>2</sub>O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur.

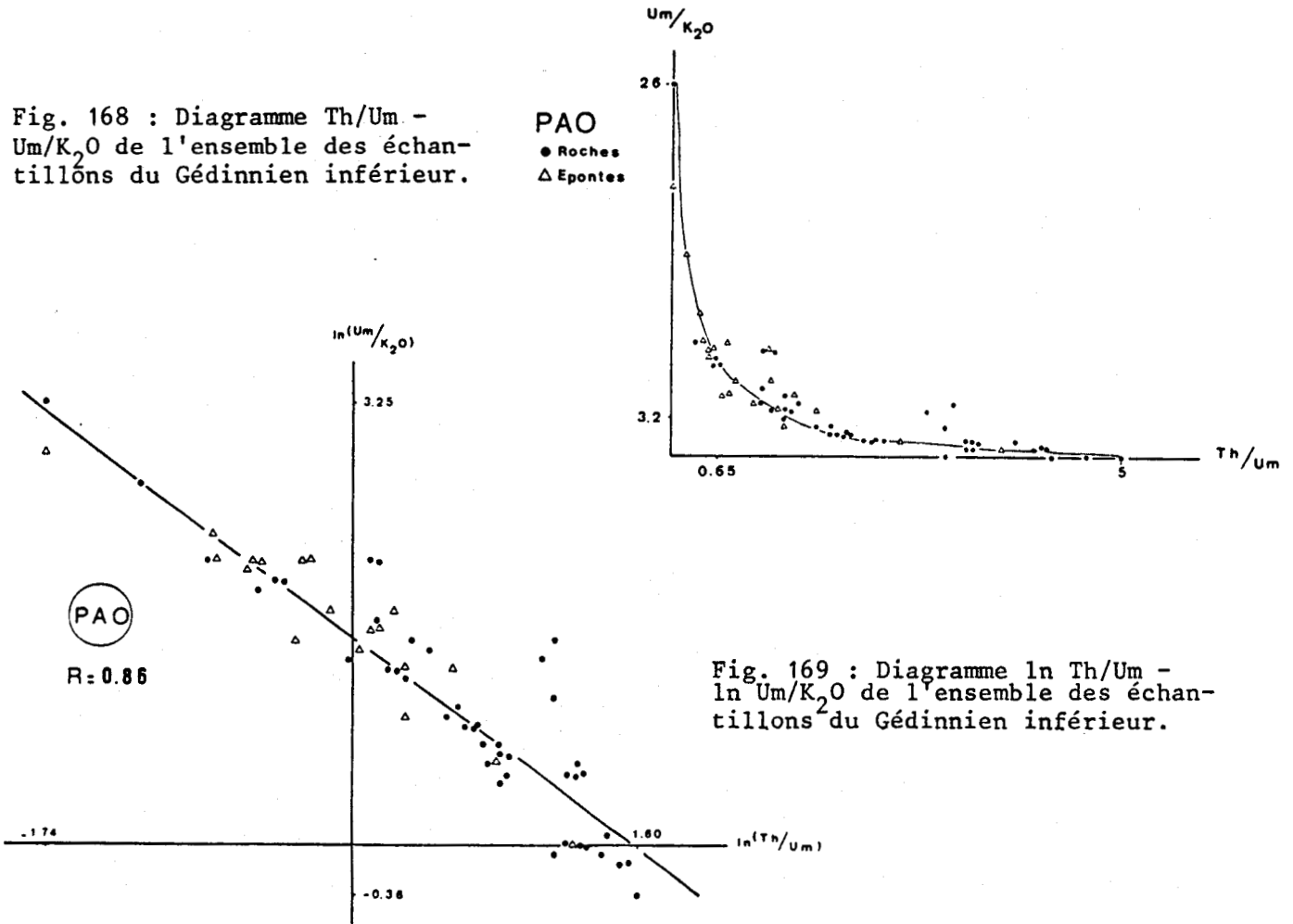


Fig. 169 : Diagramme ln Th/Um - ln Um/K<sub>2</sub>O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur.

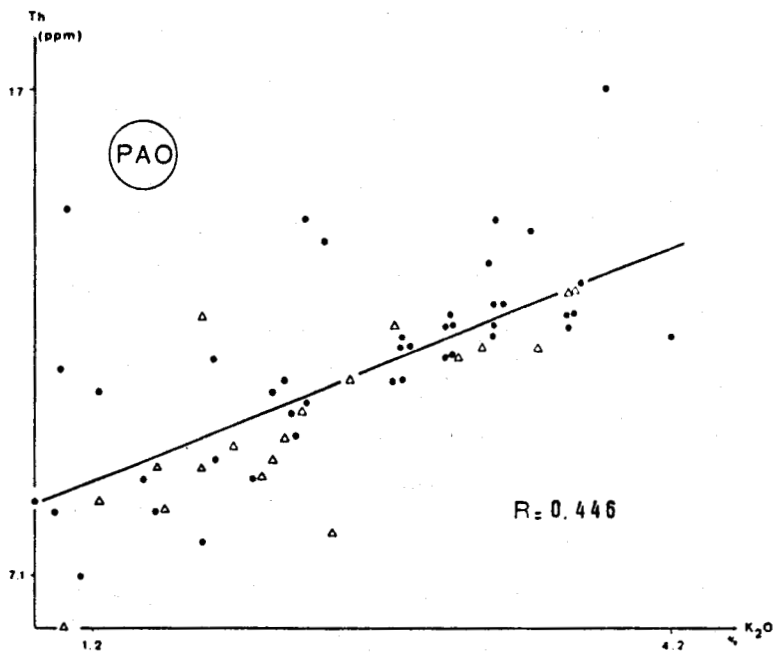


Fig. 170 : Diagramme Th - K<sub>2</sub>O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur.

- le fait d'avoir plusieurs familles d'échantillons peut détruire partiellement la corrélation,
- les teneurs en Uranium varient dans un intervalle assez large donnant une bonne dispersion des points le long de la courbe de l'équation (1). Les teneurs en Th et  $K_2O$  varient dans des fourchettes relativement étroites ce qui se traduit par un mauvais coefficient de corrélation dans la relation (2).

#### Diagramme Th/ $K_2O$ - Th/U

Cette représentation est obtenue à partir d'une transformation de la relation (1). On peut à partir de ce diagramme aboutir à la caractérisation géochimique du ou des faciès étudiés.

11

semblerait qu'il se dégage plusieurs tendances. Ainsi, certains échantillons paraissent s'aligner selon une courbe porteuse de type IIIa (schistes normaux), d'autres semblent le faire sur une courbe de type II (grès). Mais ceci n'est pas évident, le fait certain reste l'hétérogénéité de l'ensemble ainsi souligné.

#### 6.2.5.3. Remarques sur les différences et similitudes mises en évidence par l'étude des faciès

La base de ce commentaire est synthétisé par le tableau des coefficients de la figure

- un des faits constants de cette étude est que, bien que la valeur de "b" soit proche de -1, la relation (2) est très mal vérifiée. Ce fait est probablement dû à la faible dispersion des teneurs en Th et  $K_2O$ , alors que les faibles fluctuations de la teneur en U donnent une bonne corrélation de la loi (1) et un "b" proche de -1.

Ajoutant à ceci que les meilleurs coefficients R, pour la loi (2) sont obtenus pour les quartzophyllades et les éponges, les premières voient leur microfaciès fluctuer fortement (alternance de microlites de grès et de phyllades), les secondes sont en fait une association de tous les faciès possibles. Dans les deux cas, cela entraîne une plus forte dispersion des valeurs de Th et  $K_2O$ .

- La valeur de "d'" (relation (2)) doit avoir une signification. En effet, si on considère successivement les grès, les quartzophyllades et les phyllades, on note que la valeur de ce coefficient est croissante (0,3; 2,516; 11,052). Ceci se traduit par une ordonnée à l'origine plus ou moins forte

selon le faciès. Ce qui revient à écrire que le déficit en  $K_2O$  est plus ou moins fort mais toujours présent. Son maximum étant observé pour les phyllades, roches pourtant riches en minéraux argileux (illite notamment).

- Si on considère les fluctuations de la valeur de "a", on note que la plus forte valeur est celle des grès (7,595) (si on fait évidemment exception des P.A.L. et P.A.F.). Cette variation traduit la plus grande richesse en matériel phylliteux des phyllades et quartzophyllades. La forte valeur générale de "a" traduit le faible poids de  $K_2O$  devant l'Uranium.

- les coefficients R de la loi (1) sont bons, indiquant que la loi est vérifiée.

#### 6.2.5.4. Points particuliers à l'analyse des grès (fig. 171 et 172).

L'équation (1) s'écrit :  $U/K_2O = 7,580 (Th/U)^{-0,877}$ . Dans les deux représentations graphiques de cette loi, 1 point se place nettement à l'écart. C'est l'échantillon P.A.O.016. Il s'agit d'un grès prélevé dans la zone des failles de la carrière (3ème partie, Chapitre II). La microfracturation y est assez bien développée. Je mets son comportement plutôt en relation avec celui des remplissages qu'avec celui des roches. La valeur moyenne du coefficient de corrélation peut être attribuée à l'altération des roches à l'affleurement. La nature phylliteuse du ciment perturbe le comportement de ces grès et les fait se rapprocher de celui des phyllades. Il favorise l'imprégnation des roches par les fluides oxydants qui peuvent entraîner la mise en solution de radioéléments (U et  $K_2O$ ) de la roche. Localement, cette mise en mouvement peut aboutir à des reconcentrations (cas de P.A.O.016).

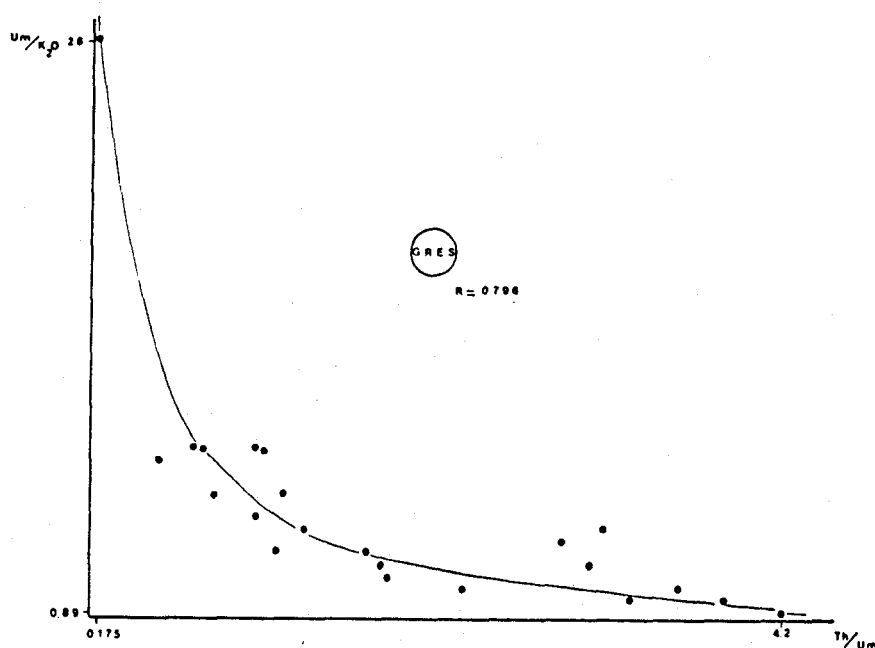


Fig. 171 : Diagramme  $Th/U_m - U_m/K_2O$  des échantillons de Grés.

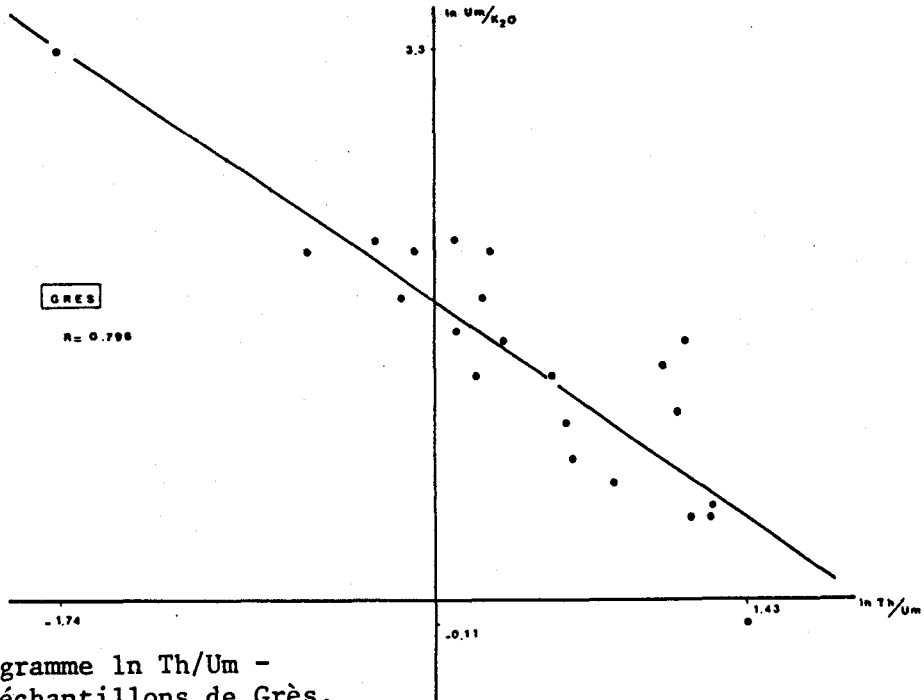


Fig. 172 : Diagramme  $\ln Th/Um$  -  $\ln Um/K_2O$  des échantillons de Grès.

6.2.5.5. Points particuliers à l'analyse des quartzophyllades (fig. 173, 174 et 175).

Il ressort des deux représentations graphiques de la loi (1) qu'il n'y a pas de famille définissable au sein de cet ensemble qui paraît former un tout. La valeur du coefficient R de cette loi est excellent ( $R=0,949$ ). La construction du diagramme de la relation  $Th/K_2O$ - $Th/U$  montre que le caractère pélitique du sédiment tend à l'emporter sur la nature arénacée : les points s'alignent le long d'une courbe porteuse de type IIIa. Quelques points s'écartent traduisant la permanence en caractère arénacé du sédiment. Par ailleurs, cette dispersion signifie probablement que la concentration en Uranium est due à des phénomènes de remobilisation (venues supergènes).

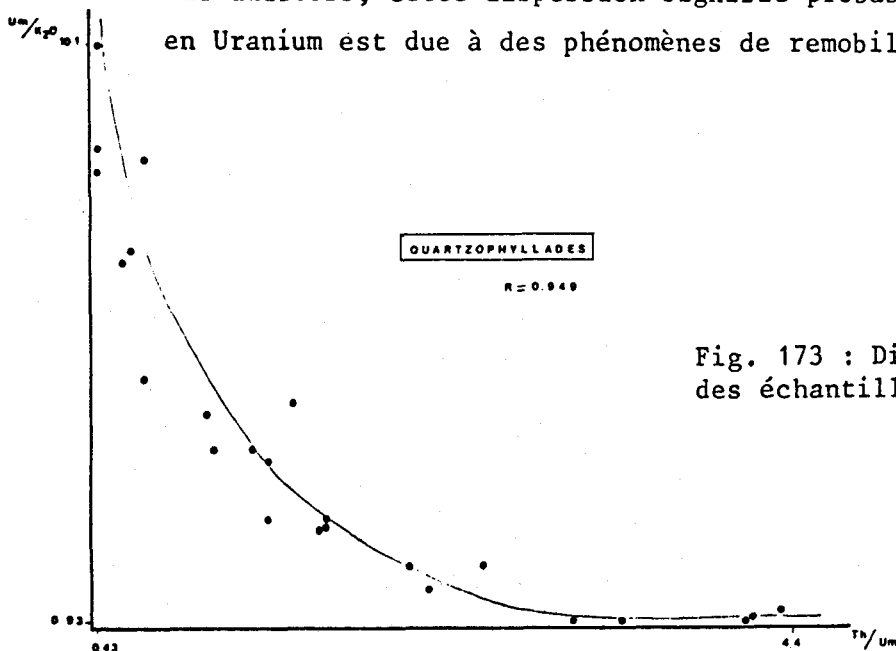


Fig. 173 : Diagramme  $Th/Um$  -  $Um/K_2O$  des échantillons de Quartzophyllades.



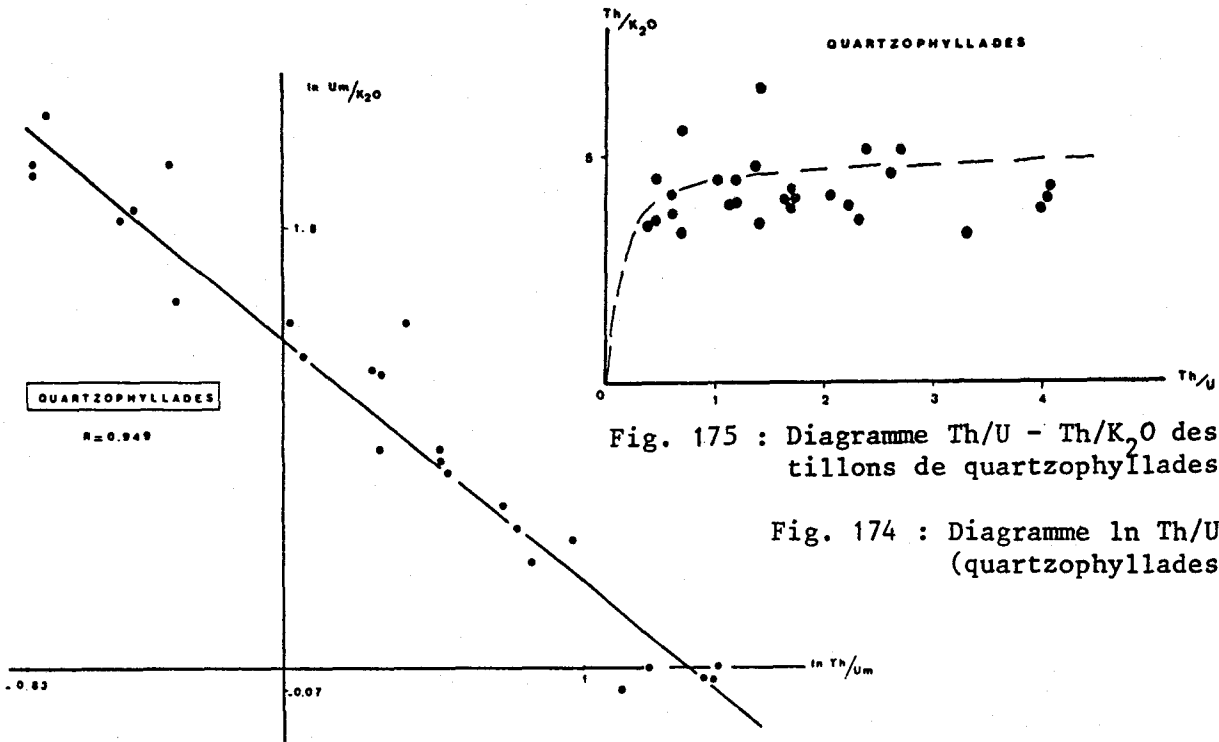


Fig. 175 : Diagramme Th/U - Th/K<sub>2</sub>O des échantillons de quartzophyllades.

Fig. 174 : Diagramme ln Th/Um - lnUm/K<sub>2</sub>O (quartzophyllades).

6.2.5.6. Points particuliers à l'analyse des phyllades (fig. 176,177,178)

La présence de quelques échantillons fortement anomaux dans cet ensemble se traduit par leur position aux fortes ordonnées dans les représentations graphiques de la loi (1).

Dans la représentation graphique de la loi Th/K<sub>2</sub>O-Th/U, la tendance décrite sur les quartzophyllades se maintient. La répartition des échantillons (fig. 178) est entièrement régie par une loi de type IIIa. On confirme ainsi l'appartenance des phyllades détritiques du Gédinnien inférieur à la famille des schistes pré-carbonifères définis par QUINIF *et al* (1982).

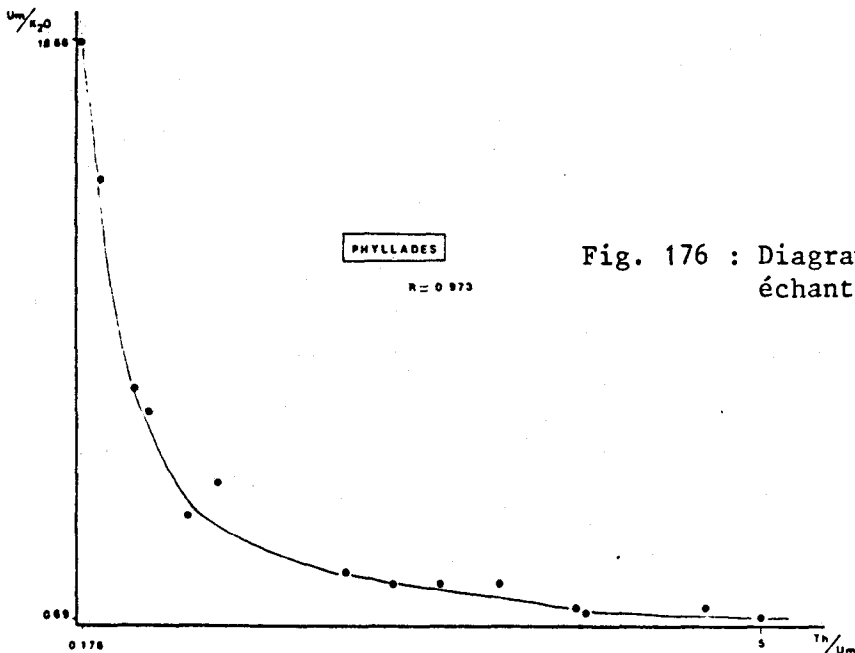


Fig. 176 : Diagramme Th/Um - Um/K<sub>2</sub>O des échantillons de phyllades.

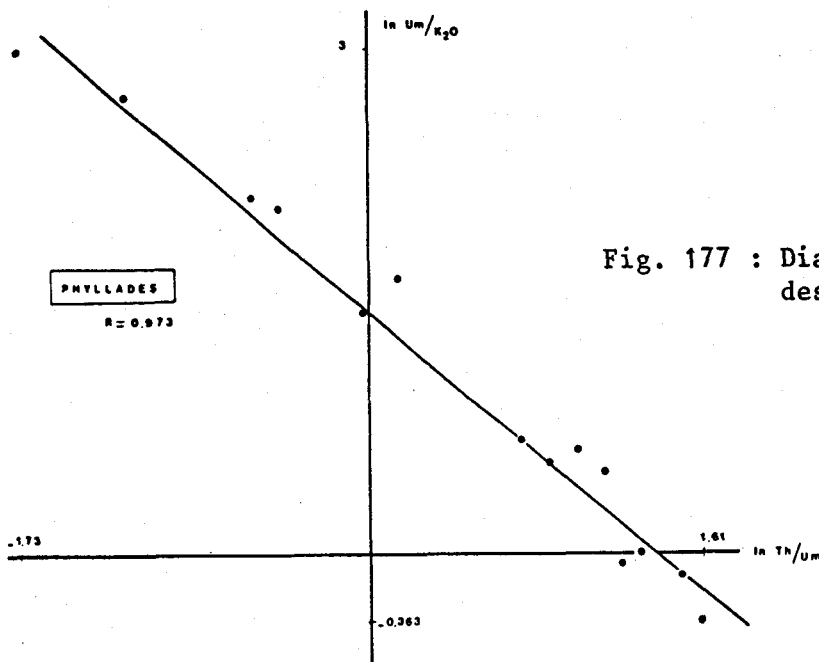


Fig. 177 : Diagramme  $\ln Th/U_m - \ln U_m/K_2O$  des échantillons de phyllades.

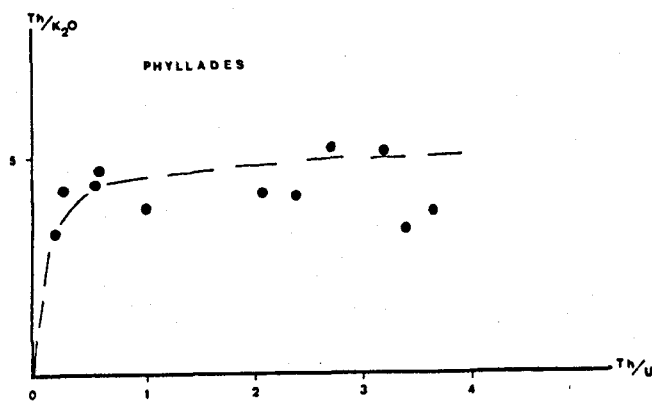


Fig. 178 : Diagramme  $Th/U - Th/K_2O$  des échantillons de phyllades.

6.2.5.7. Points particuliers à l'analyse des épontes (fig. 179, 180 et 181).

Dans les représentations graphiques de la loi  $U_m/K_2O - Th/U$ , deux points se détachent nettement. Je renouvellerai ici le commentaire déjà fait pour P.A. 0016. Ils sont dans leur comportement plus proche d'un remplissage de fracture que d'une roche.

C'est dans le cas des épontes que la relation  $Th - K_2O$  est la mieux établie (fig. 181). Comme dans tous les autres cas, il semble bien qu'il y ait un "excès" de Thorium. Ce serait du Thorium lié à la phase détritique du sédiment. Le déficit relatif en Potassium, facilement solubilisable, serait à mettre au compte du passage des fluides supergènes canalisés par le réseau de fractures.

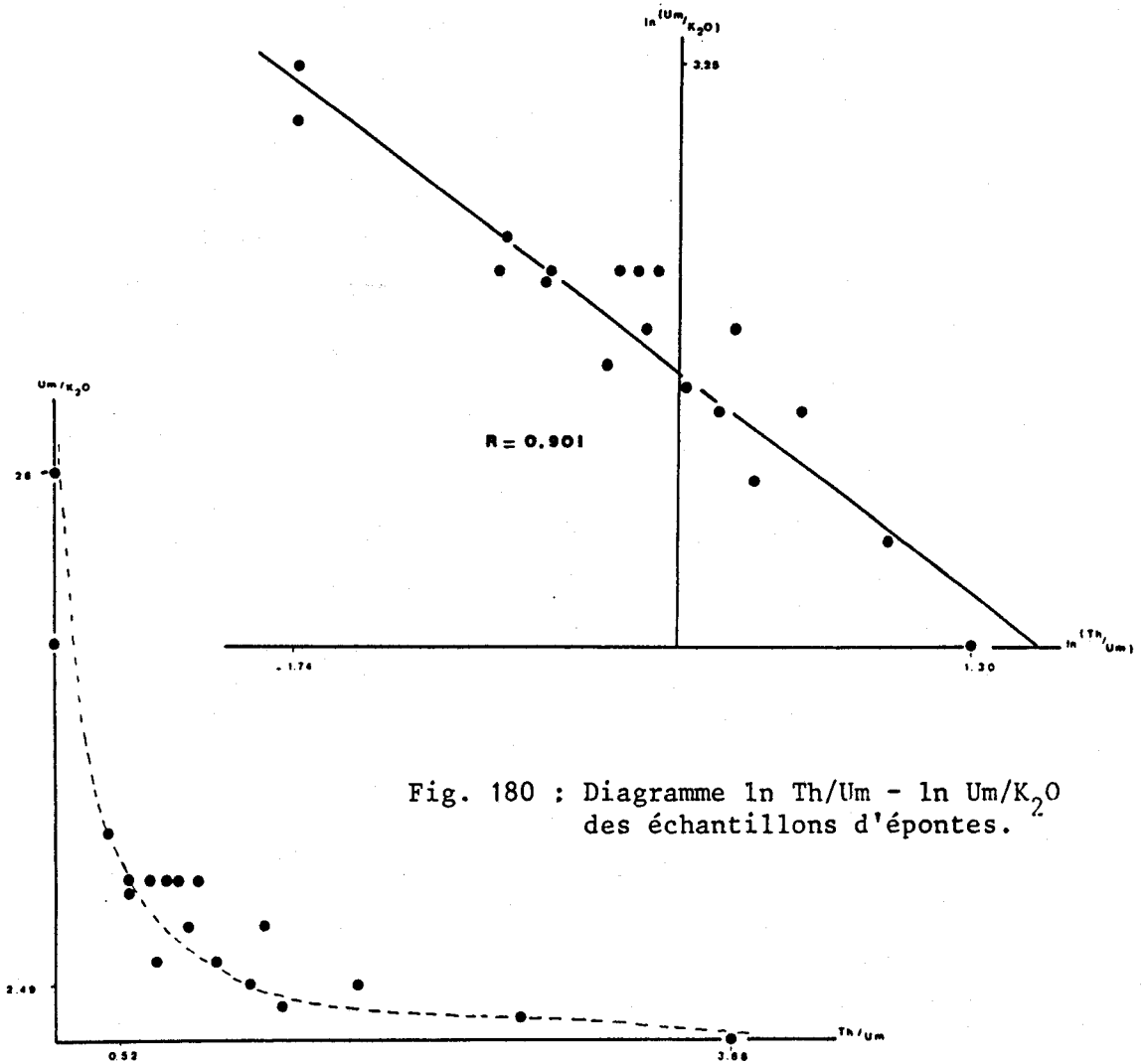
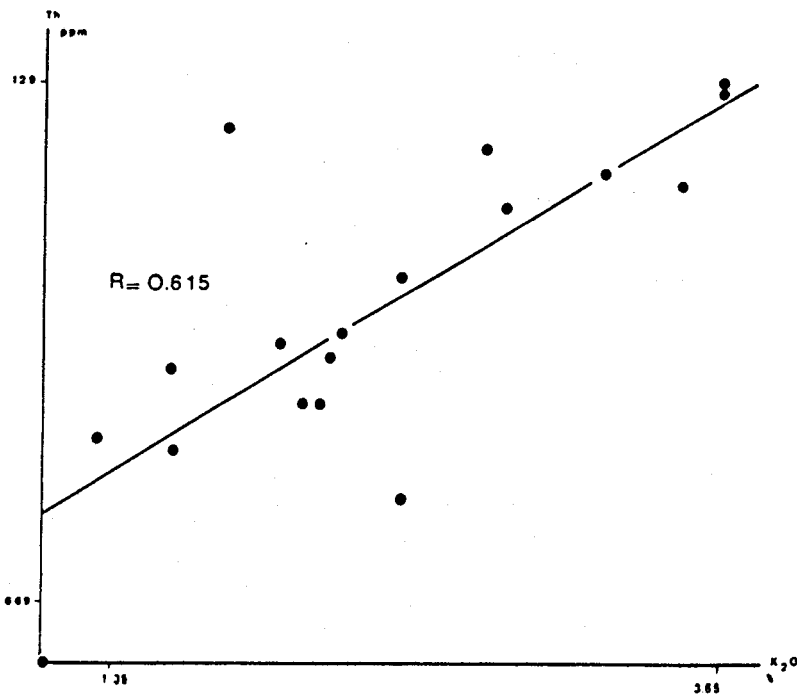


Fig. 179 : Diagramme  $\text{Th}/\text{Um} - \text{Um}/\text{K}_2\text{O}$  des échantillons d'épentes



#### 6.2.5.8. Conclusions

L'analyse en diagramme T-U-K permet de préciser plusieurs points dans l'étude menée jusqu'ici :

- l'analyse des alluvions illustre le fait que l'Uranium, présent en leur sein, n'est pas le responsable des anomalies en Radon;
- l'analyse des remplissages de fractures montre :
  - . que la concentration de l'Uranium est indépendante des teneurs en Thorium et Potassium ( $b = -1$ ),
  - . que le Th et le K n'obéissent pas aux mêmes mécanismes de concentration : le premier est probablement détritique, le second est influencé par les fluides qui remobilisent les éléments solubilisables.
- l'analyse des roches montre :
  - . que l'indépendance de l'Uranium vis à vis des autres radioéléments est une constante des faciès analysés,
  - . le déficit en Potassium, probablement dissout par les solutions oxydantes alors que le Thorium plus fortement lié reste en place;
- les faciès géochimiques mis en évidence montrent que les roches anoma-  
les du Gédinnien inférieur étudiées se rapprochent toutes plus ou moins  
de la courbe porteuse caractérisant les phyllades anomaes où l'Uranium  
est secondaire. Ceci confirme le caractère épigénétique ou supergène de la  
concentration en Uranium dans les roches.



# CHAPITRE VII

TRAITEMENT DES DONNEES PAR ANALYSE FACTORIELLE





## CHAPITRE VII.- TRAITEMENT DE L'ENSEMBLE DES DONNEES EN ANALYSE MULTIVARIABLE

### 7.1. INTRODUCTION - GENERALITES

Pour ce qui est des généralités sur la méthode employée, je renvoie le lecteur en 2ème partie, Chapitre III, paragraphe 3.3.4. En effet, la méthode de traitement des données utilisée pour cette étude est la même que celle employée pour l'étude climatologique.

Dans l'étude des échantillons de sédiments, j'ai distingué 3 ensembles fondamentaux : les alluvions, les remplissages de fractures et les roches sédimentaires du Gédinnien inférieur. Pour chacun de ces ensembles, j'ai réalisé une ou plusieurs analyses multivariées (A.M.) selon le type et le nombre de données concernées.

### 7.2. ANALYSE MULTIVARIABLE DES ALLUVIONS

#### 7.2.1. LES VARIABLES

Toutes les variables considérées dans cette A.M. sont des variables radiométriques. J'y distingue deux groupes, celui qui correspond à l'analyse des sédiments en spectrométrie gamma (eU, Um, Th, K, Ra/U), celui qui correspond aux dosages en Radon moyens et maxima des sources confiées à chaque échantillon de matériel de couverture.

Le but recherché était de confirmer, par ce mode de représentation l'indépendance entre les radioéléments présents dans le sédiment et le Radon dosé dans les eaux de source.

#### 7.2.2. L'A.M.

##### 7.2.2.1. La position des variables

6 facteurs dont trois principaux sont apparus. Je n'en ai retenu que 2 qui regroupent 68,95 % de l'information (fig. 182). L'étude du tableau de la figure 182 et du graphique de la figure 183 permet de définir trois pôles principaux dans l'organisation des variables : un pôle uranifère (selon F1 et F2) qui groupe eU et Um  
un pôle Th-K (selon F1)  
un pôle Radon (selon F1 et F2)

Le rapport Ra/U est à opposer au paramètre eU. En effet, si on suit la migration des pôles Ra/U et eU dans les colonnes du tableau de la figure 182 on remarque que leurs mouvements sont antagonistes. Ceci est probablement dû au fait que l'équilibre radioactif n'est pas atteint pour la famille de l'Uranium.



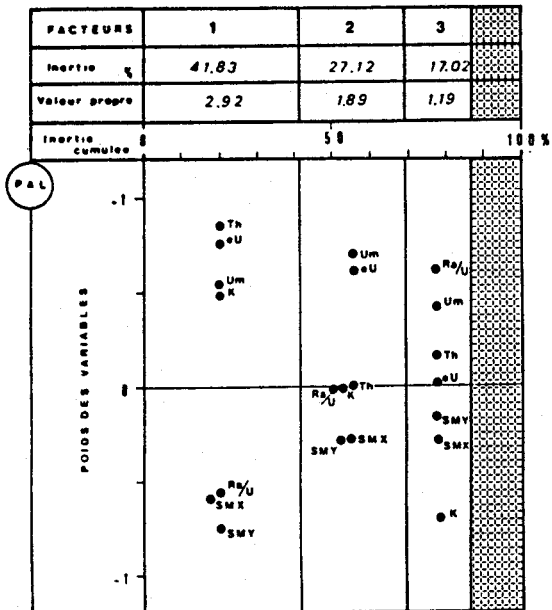


Fig. 182 : A.M. des alluvions : poids des facteurs

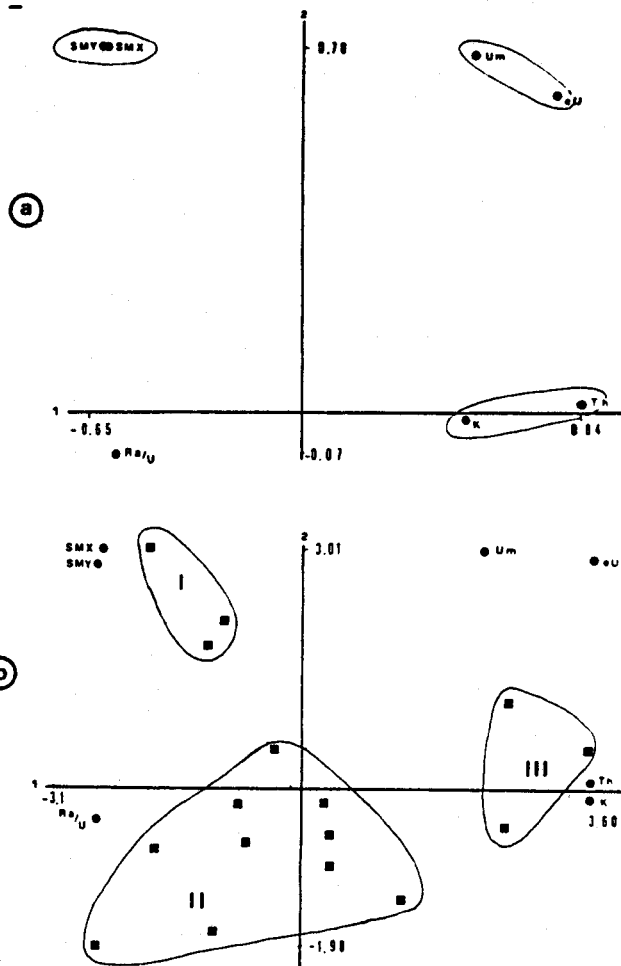


Fig. 183 : A.M. des alluvions représentation du plan F1 - F2 : a position des variables b position des individus

Le point le plus important qui ressort de l'étude de la position des variables est l'indépendance des variables Radon et Uranium des alluvions.

7.2.2.2. La position des individus

16 échantillons ont été analysés (fig. 183b). Il aurait été intéressant de pouvoir discerner les différentes zones de prélèvement. Si on réalise un patateïde pour famille, les quatre formes obtenues sont différentes mais peu représentatives (manque d'individus). Le seul fait significatif est que l'on peut former trois groupes d'échantillons (fig. 183) :

I. échantillons à teneur en Uranium supérieure au clarke des alluvions (P.A.L.007, 010, 020) (voir 3ème partie, Chapitre II) et correspondant à des ruisseaux dont les sources sont à forte concentration en Radon;

II. échantillons à forte teneur en Uranium (P.A.L.003, 014, 018);

III. échantillons à teneur en Uranium variable mais rarement anormale et correspondant à des ruisseaux dont les sources sont à faible concentration en Radon.

FACTEURS	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	
INERTIE S	60.50	18.00	
VALEUR PROPRE	4.22	1.26	
INERTIE CUMULEE	50		138 K

POIDS DES VARIABLES	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
K	0.1	0.1
Th	0	0
Ra/U	-0.1	-0.1
Ur	-0.1	-0.1
TCA	-0.1	-0.1
U	-0.1	-0.1
Um	-0.1	-0.1
eU	-0.1	-0.1

Fig. 184 : A.M. I des remplissages de fractures : poids des facteurs ( les symboles utilisés pour les radioéléments seront les même pour toute cette A.M.)

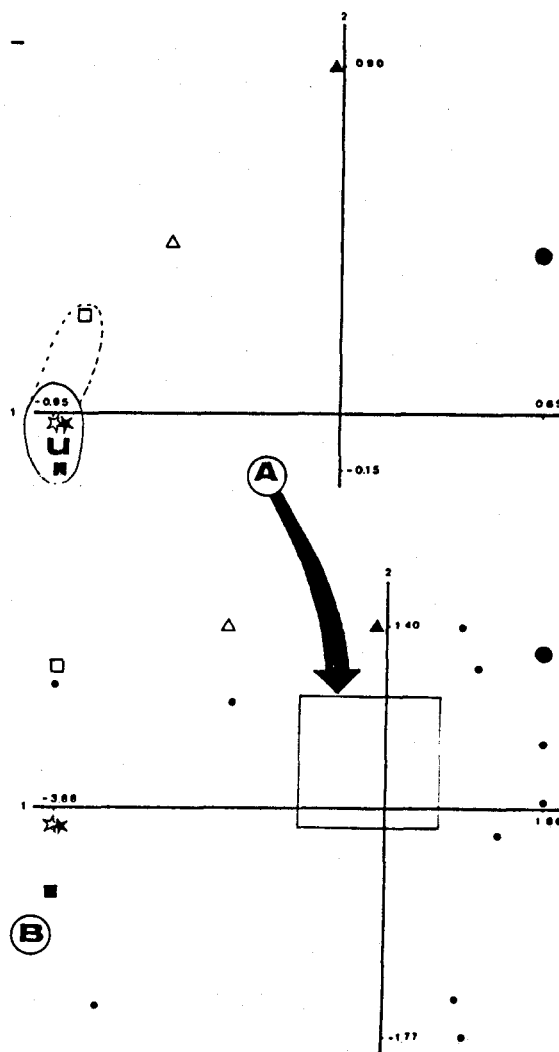


Fig. 185 : A.M. des remplissages  
 A. position des variables dans le plan F1 - F2  
 B. position des individus

### 7.3. ANALYSE MULTIVARIABLE DES REMPLISSAGES DE FRACTURE

#### 7.3.1. INTRODUCTION

J'ai procédé en trois étapes. Tout d'abord, j'ai considéré les variables radio-métriques puis j'y ai ajouté les variables liées au fer et enfin celles liées à la minéralogie des argiles. Je vais donc commenter successivement ces trois analyses. Mon principal but était de voir comment se combinent les diversent variables avec les teneurs en radioéléments.

#### 7.3.2. TRAITEMENT I : LES VARIABLES RADIOMETRIQUES

L'ensemble de ces variables conduit à l'individualisation de 6 facteurs. Deux d'entre eux (F1 et F2) traduisent 78,47 % de l'information. La figure 184 donne la représentativité de chacun des deux facteurs F1 et F2 ainsi que le poids des variables selon ces deux facteurs. La figure 185 montre les positions des variables et des individus dans le plan F1-F2.

Le traitement mathématique confirme les acquis des chapitres précédents :

- la bonne corrélation Um-eU, Um-TCA (anticoïncidence);
- la mauvaise relation Th-K<sub>2</sub>O;
- la relation moyenne entre Um et Ur (radioactivité de terrain).

Les deux facteurs retenus sont caractérisés chacun par un pôle : le facteur F1 est le pôle Uranium mis en évidence par le groupement des variables caractéristiques de cet élément :Um, eU, TCA, Ur;

Le facteur F2 représente le pôle "détritique" : il est ici caractérisé par la position de Th, le K<sub>2</sub>O n'entre en jeu que plus discrètement (influence du lessivage). Ce qui confirmerait les observations faites au chapitre VI (3ème partie) sur la mauvaise relation Th-K<sub>2</sub>O.

La distinction de ces deux pôles, sur des axes orthogonaux entre eux, montre leur indépendance. On confirme ainsi les observations faites lors de l'analyse en diagramme Th-U-K où on a vu que la relation Th/Um - Um/K<sub>2</sub>O livre un coefficient "b" proche de -1.

Enfin les échantillons (fig. 185) semblent former trois sous-ensembles :

- 1 : les plus riches en Uranium proches du pôle U
- 2 : les échantillons normaux, proches du pôle détritique
- 3 : groupe mixte

### 7.3.3. TRAITEMENT II : VARIABLES RADIOMETRIQUES, VARIABLES LIEES AU FER (GEOCHIMIQUES ET MINERALOGIQUES)

L'ensemble de ces variables conduit à l'individualisation de 6 facteurs. Deux d'entre eux (F1 et F2) traduisent 69,33 % de l'information. La figure 186 donne la représentativité de chacun des deux facteurs F1 et F2 ainsi que le poids des variables selon ces facteurs. La figure 187 donne les positions des variables et des individus dans le plan F1-F2.

Le traitement mathématique fait apparaître que :

- . le facteur F1 reste celui de l'Uranium, la liaison Uranium-Fer est bien marquée par le groupement des variables. Les variables les mieux liées au pôle Uranium sont le pourcentage de fer total, la cristallinité de la Lépidoïdocracite et dans une moindre proportion celle de la Goëthite. Les pourcentages de ces deux hydroxydes de fer (L et G) ne sont pas corrélés avec l'Uranium. Ces faits confirment les observations faites en 3ème partie, Chapitre IV et VI;
- . le facteur F2 est apparemment celui des hydroxydes de fer qui forment un dipôle (fig. 186) masquant l'influence qu'avaient les variables détritiques sur ce facteur dans le traitement I. Ceci finalement est une confirmation du peu de poids de Th et K<sub>2</sub>O;

FACTEURS	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	
INERTIE %	46,51	22,02	
VALEUR PROPRE	5,11	2,51	
INERTIE CUMULEE	50		100 %
POIDS DES VARIABLES	+1	☆ ☆ ☆ △	☆ ☆ ☆ ☆
	0	△ ☆ ●	☆ ☆ ☆
	-1		☆ ☆ ☆

Fig. 186 : A.M. II des remplissages de fractures : poids des facteurs.

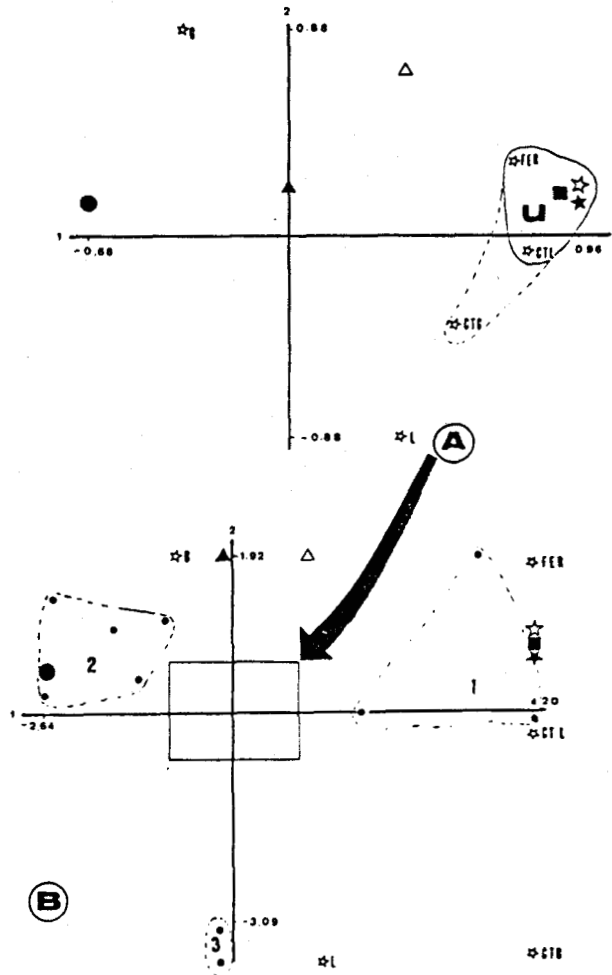


Fig. 187 : A.M. II des remplissages :  
A. position des variables dans le plan F1 - F2 ; B. position des individus

Les groupements de points déjà signalés restent les mêmes, confortant les théories sur le comportement de l'Uranium dans les remplissages de fractures. En effet, le groupe 1 est celui des échantillons riches en Uranium et en Fer, peu lessivé; le groupe 2 est celui des échantillons les moins riches en Uranium, les plus riches en éléments détritiques d'où sa position tirée vers le pôle détritique: le groupe 3 a une position intermédiaire traduisant ainsi un stade du lessivage compris entre les deux précédents.

#### 7.3.4. TRAITEMENT III : VARIABLES RADIOMETRIQUES, GEOCHIMIQUES (FER), MINERALOGIQUES (FER ET ARGILES)

Le traitement aboutit à l'individualisation de 6 facteurs, F1, F2 et F3 traduisent 76,46 % de l'information. La figure 188 donne la représentativité de chacun d'entre eux ainsi que le poids des variables. La figure 189 donne la position des variables et des individus dans le plan F1-F2.

Le traitement mathématique, en plus des faits déjà énoncés, montre que :

- le pôle Uranium du Facteur F1 s'enrichit d'une variable : l'Illite;
- le facteur F2 reste le dipôle (G-L) déjà décrit;

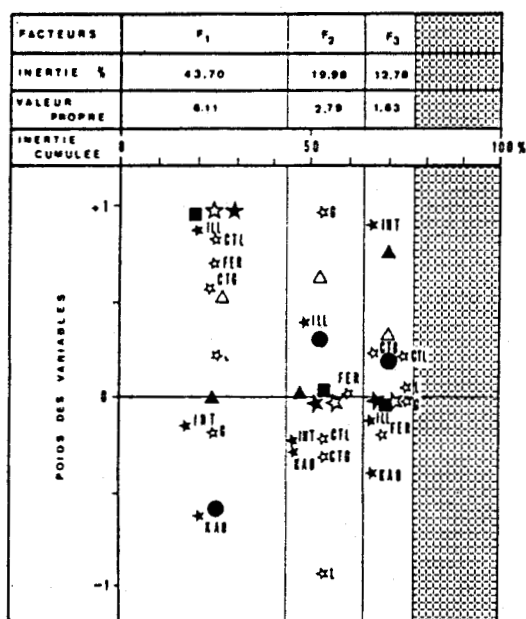


Fig. 188 : A.M. III des remplissages de fractures : poids des facteurs

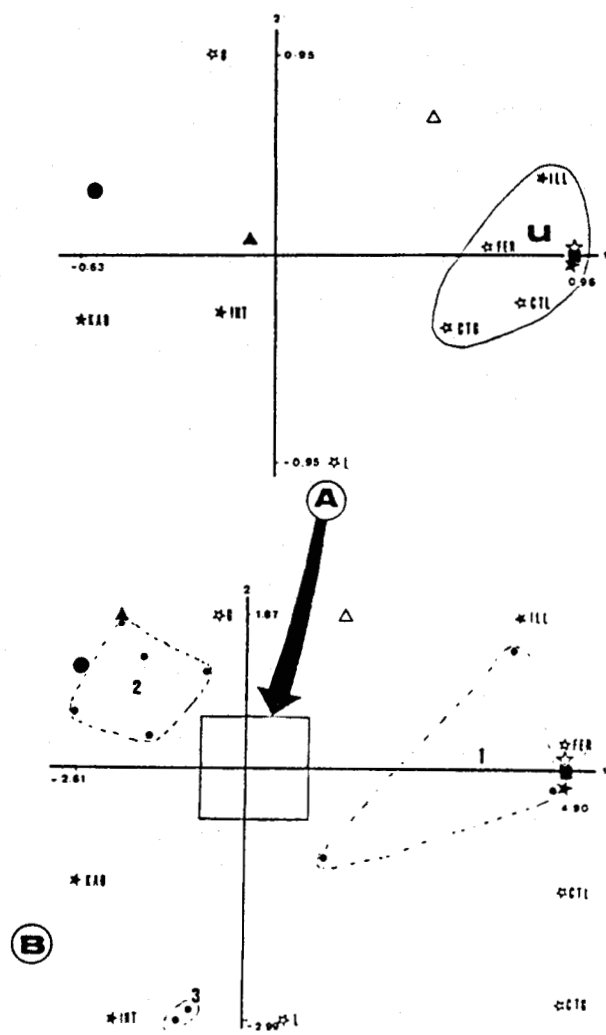


Fig. 189 : A.M. III des remplissages  
 A. position des variables dans le plan F1 - F2  
 B. position des individus

- les interstratifiés tendent à accompagner le Thorium;
- le facteur F3 est le facteur du pôle détritique (Th);
- la position des individus dans ce même plan confirme les trois ensembles, leur groupement n'est pas perturbé par l'introduction de données nouvelles.

### 7.3.5. CONCLUSION

L'A.M. a confirmé les acquis des diverses études menées précédemment, notamment les relations avec l'Illite, la cristallinité de la Lépidocrocite et la teneur en fer. Par ailleurs, cette analyse a montré que les relations mises en évidence ne s'opposent pas mais qu'elles se complètent. Il semble donc que l'Uranium se fixe; épigénétiquement, à la fois sur les oxy-hydroxydes de fer et sur les minéraux argileux (Illite) altérés.

Dans le chapitre IV (3ème partie) j'ai distingué deux familles d'échantillons au sein des relations Um-CtL et Um-ILL, il apparaît qu'en fait les choses sont plus complexes et qu'il faille distinguer trois familles d'individus :

- le groupe 1 est celui des échantillons peu lessivés, très riches en Uranium (PAF 024, 025, 026);
- le groupe 2 est celui des échantillons très lessivés et qui ont perdu une bonne part de leur Uranium (PAF 027, 028, 029, 030, 031);
- le groupe 3 est un groupe mixte dont le lessivage n'a pas été aussi intense que pour le groupe 2 ou dont les teneurs en Uranium initiales étaient probablement plus élevées (PAF 032, 038).

7.4. A.M. DES ROCHES

7.4.1. TRAITEMENT I : DONNEES RADIOMETRIQUES

Le traitement mathématique des données radiométriques met en évidence six facteurs. J'ai retenu deux d'entre eux (F1 et F2) qui traduisent 75,81 % de l'information. On trouvera les résultats en figure 190.

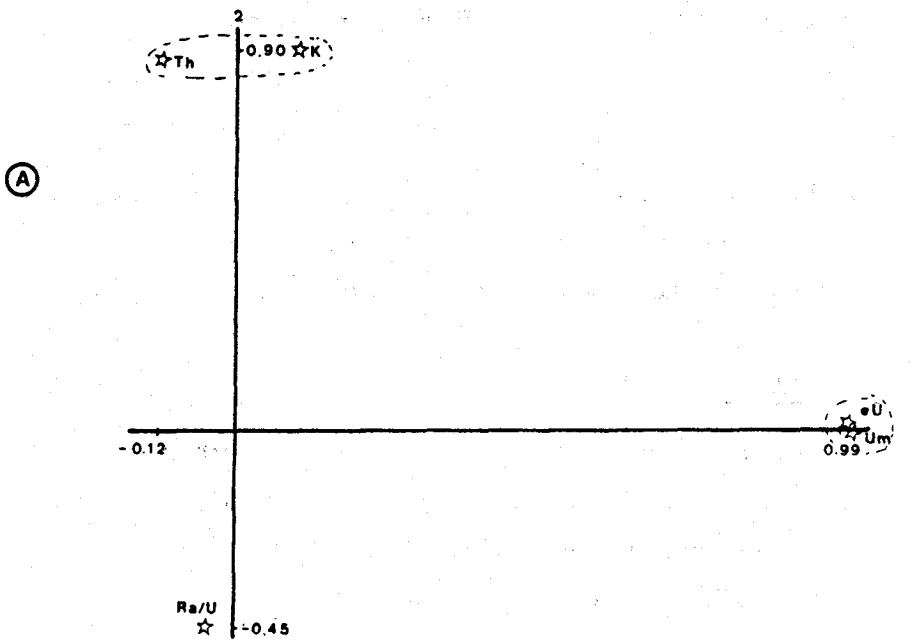
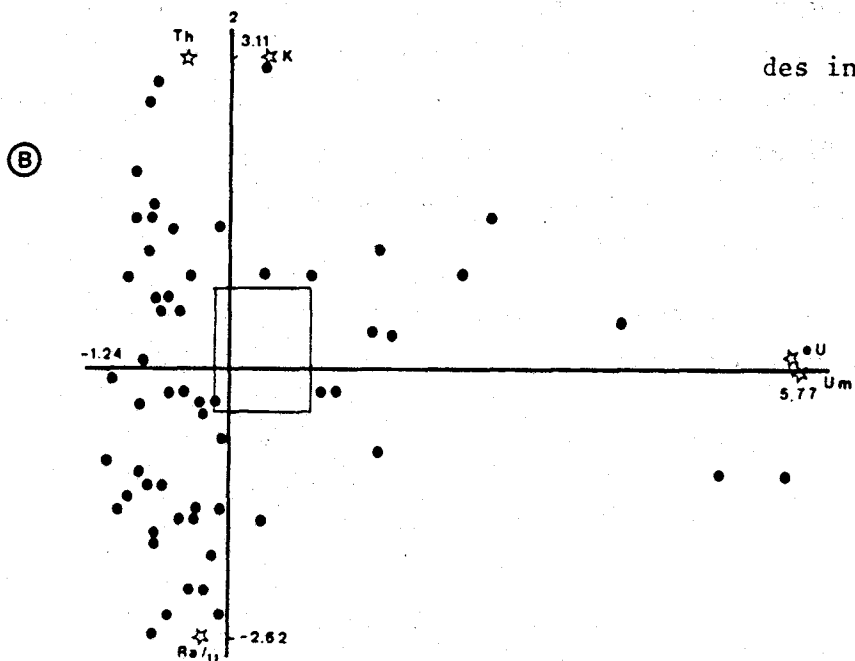


Fig. 190 : A.M. I des roches : A. position des variables dans le plan F1 - F2  
B. position des individus



L'analyse des données radiométriques montre l'existence de deux pôles. Chacun d'entre eux caractérise un des facteurs. F1 est le facteur de l'Uranium, F2 celui du Th et du  $K_2O$  (c'est le facteur détritique). Cette opposition F1 et F2 confirme l'indépendance de l'Uranium vis à vis des autres variables radiométriques.

#### 7.4.2. TRAITEMENT II : VARIABLES RADIOMETRIQUES ET M.O.D.

##### 7.4.2.1. Introduction

On a vu en 3ème partie, Chapitre IV, qu'il semble que la M.O.D. joue un rôle dans la fixation de l'Uranium. J'ai tout d'abord traité l'ensemble des échantillons sans distinction.

Il en ressort que la polarité des facteurs F1 et F2 reste la même. Ils traduisent 69 % de l'information. Par ailleurs, il apparaît que la M.O.D. voit sa position dans l'espace de corrélation conduite par deux pôles principaux :

- le pôle Uranium pour 39 %,
- le pôle Potassium pour 46 %.

La matière organique joue donc un certain rôle dans la fixation de l'Uranium mais elle reste caractéristique du matériel détritique. Poussant plus loin l'analyse, j'ai réalisé les A.M. des deux familles distinguées au chapitre IV.

##### 7.4.2.2. Traitement II - M.O.D. (1) : famille I

Dans cette analyse F1 et F2 traduisent 83,82 % de l'information. Le facteur F1 est celui de l'Uranium et de la M.O.D., F2 est celui du pôle détritique (Th et  $K_2O$ ) (fig. 191). Lorsqu'on étudie la position des variables, il est clair que l'Uranium accompagne la M.O.D. dans cette famille d'échantillons. Le Potassium qui semble avoir un poids important dans l'étude générale n'influe pas ici la position du pôle M.O.D. ( $n = 0,29$ ).

L'étude de la position des individus montre l'existence de deux groupes. L'un est très restreint (P.A. 0.016 et P.A.O. 065). Il est composé d'individus riches en Uranium (de l'ordre de 45 à 50 ppm d'Um). Leur comportement un peu particulier a été observé tout au long de diverses études. Il semble que leur comportement est à mettre en relation avec leur situation dans des zones très fracturées et riches en Uranium qui serait lié à la Limonite.

Le second groupe, plus important et plus dispersé dans l'espace, voit se développer l'influence du pôle détritique.



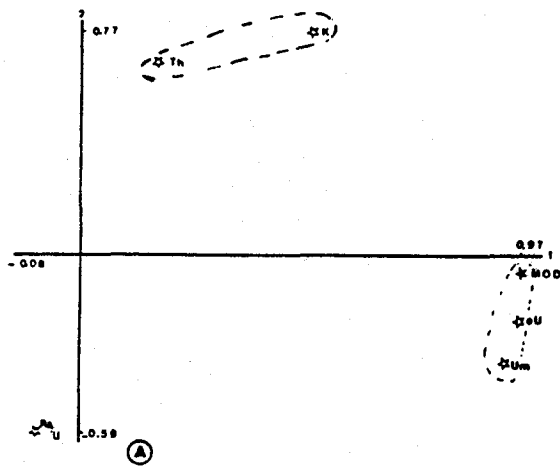
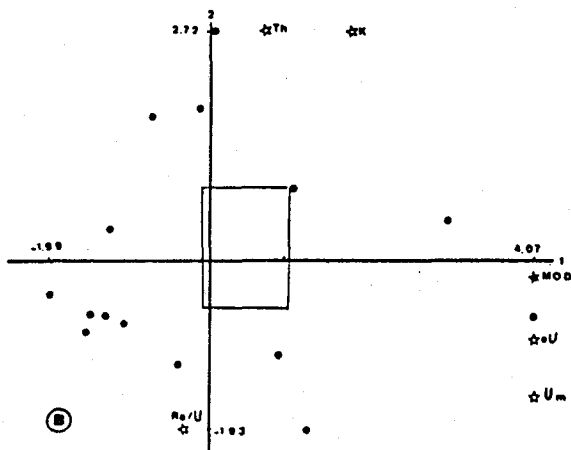


Fig. 191 : A.M. II, M.O.D. (2) :

A. position des variables dans le plan F1 - F2

B. position des individus



#### 7.4.2.3. Traitement II - M.O.D. (2) : Famille II

Les facteurs  $F_1$  et  $F_2$  sont représentatifs de 74,95 % de l'information. Le facteur  $F_1$  est celui de l'Uranium et de la M.O.D. (fig. 192), le facteur  $F_2$  reste le facteur détritique (Th,  $K_2O$ ). L'ensemble de ces échantillons, considéré seul, montre une liaison Uranium-M.O.D. ( $R = 0,86$ ) soulignant une nouvelle fois le rôle fixateur que jouent les micromilieus réducteurs que sont les particules organiques.

Il y a une différence dans le comportement de la M.O.D. vis à vis du pôle détritique par rapport à l'ensemble précédent. En effet, il semble que la liaison  $K_2O$ -MOD s'améliore un peu dans ce cas ( $r = 0,44$ ). Ceci expliquerait en partie l'existence des deux relations linéaires Um-M.O.D. (3ème partie, Chapitre IV).

Il semble établi qu'il y ait deux comportements de l'Uranium vis à vis de la M.O.D. Je pense qu'il faut chercher les explications soit dans des critères "physiques" liés à l'état de la roche : porosité, degré d'altération, proportions de minéraux argileux ..., soit dans le degré d'évolution de la matière organique.

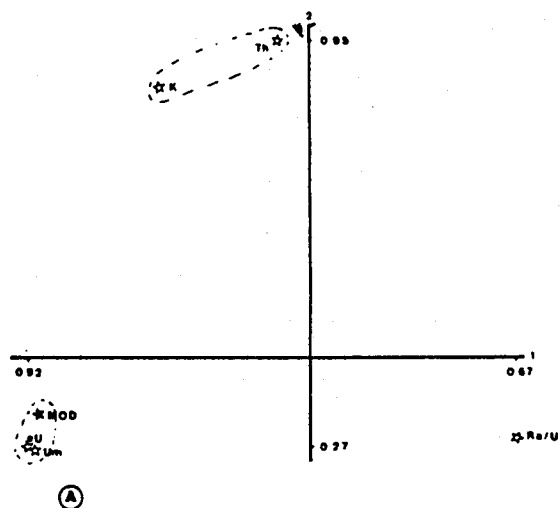
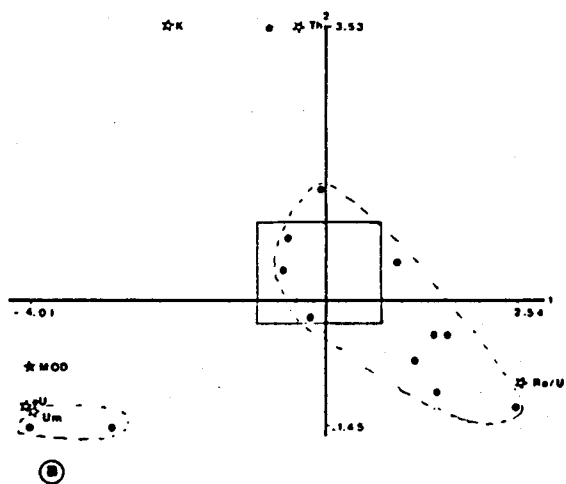


Fig 192 : A.M. II, M.O.D.(1):

- A. A. position des variables dans le plan F1 - F2
- B. B. position des individus



7.4.3. TRAITEMENT III : DONNEES RADIOMETRIQUES, POURCENTAGE D'ILLITE

7.4.3.1. Introduction

Dans un premier temps, j'ai considéré l'ensemble des échantillons analysés sans tenir compte des acquis du chapitre IV (3ème partie). Dans cette A.M., 62,35 % de l'information sont représentés par deux facteurs F1 et F2 : F1 est le facteur détritique caractérisé par un dipôle (Th, K<sub>2</sub>O) - Illite; F2 est le facteur de l'Uranium. On voit donc que l'Uranium s'efface devant la tendance détritique des roches. L'Illite n'est pas en relation directe avec l'Uranium.

7.4.3.2. Traitement III-Illite (1) : famille d'échantillons I

F1 et F2 traduisent 83,30 % de l'information. F1 est le facteur de l'Uranium et de l'Illite qui forment un pôle unique (fig. 193); F2 est le facteur détritique (Th et K<sub>2</sub>O). Le fait important de cette A.M. Illite (1) est la confirmation de la bonne corrélation qui existe entre l'Illite et l'Uranium. La position des individus dans le plan, F1-F2 montre l'existence de deux groupes. Le premier est constitué d'échantillons dont le comportement est celui d'épentes et dont la teneur en Uranium est assez élevée (de l'ordre de 20 ppm d'Um). Le second est formé de roches dont les teneurs en Uranium sont normales le plus souvent.

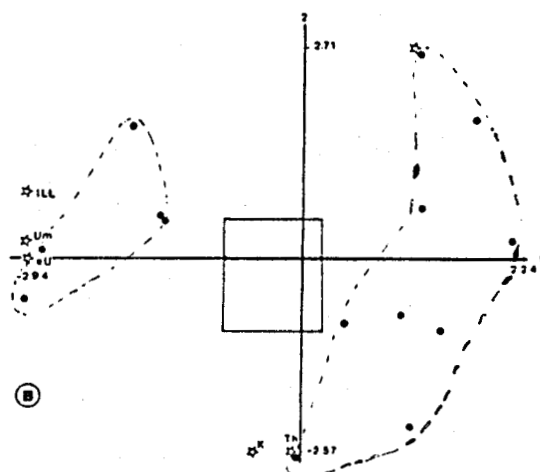
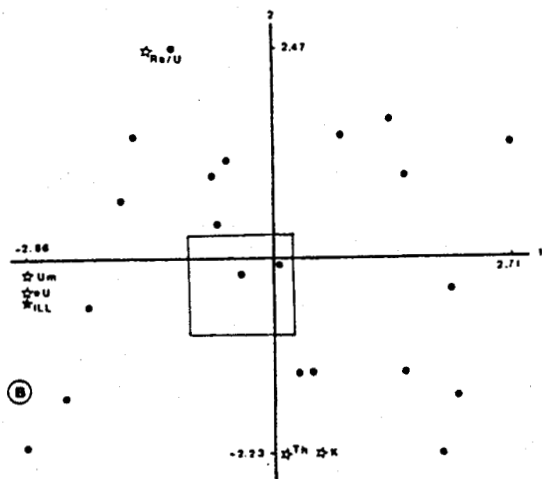
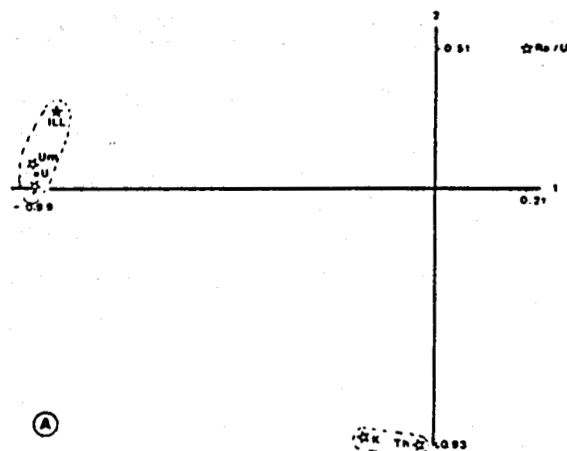
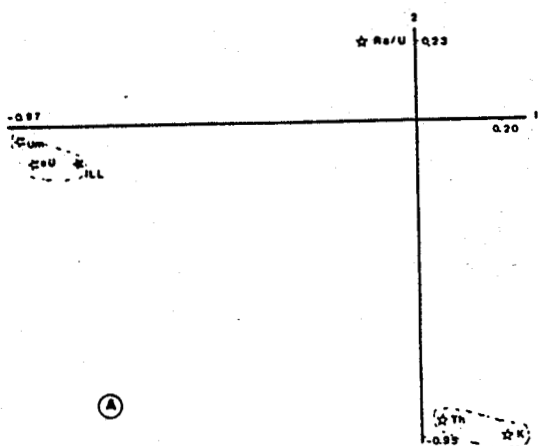


Fig. 194 : A.M. III, ILLITE (2)

- A. position des variables dans le plan F1 - F2
- B. position des individus

Fig. 193 : A.M. III, ILLITE (1) :

- A. position des variables dans le plan F1 - F2
- B. position des individus

7.4.3.3. Traitement III - Illite (2) : famille d'échantillons II

F1 et F2 traduisent 73,51 % de l'information. Les résultats sont présentés en figure 194. On constate que la relation mise en évidence au Chapitre IV (3ème partie) est confirmée. Les grands traits du comportement des variables sont les mêmes que pour l'A.M. Illite (1). Les différences résident en : une moins bonne corrélation entre l'Illite et l'Um ( $r = 0,67$ ) et un déplacement dans l'espace de corrélation du pôle Illite qui accompagne un déplacement du pôle  $K_2O$  (fig. 193 et 194).

Cette étude a donc confirmé l'existence des deux familles d'échantillons. L'Uranium se fixe sur les Illites selon deux mécanismes. Ces derniers sont certainement à établir selon des critères du type suivant :

- proportion d'argile dans la composition de la roche,
- degré de microfracturation,
- degré d'altération,
- état de cristallinité des minéraux argileux.

7.4.4. TRAITEMENT IV : VARIABLES RADIOMETRIQUES, TENEUR EN FER

Deux des six facteurs révélés par l'A.M. représentent 73,52 % de l'information (F1 et F2). F1 est le facteur du pôle détritique (fig. 195). Ce dernier est constitué du triplet Th, K<sub>2</sub>O, Fer. Le fer est bien lié au K<sub>2</sub>O (r = 0,74), un peu moins au Th (r = 0,46), mal avec U (r = 0,22). Le facteur f2 est celui du pôle Uranium. Il semble donc que la liaison fer-Uranium ne soit pas aussi claire pour les roches que pour les remplissages de fractures.

Tout en gardant à l'esprit les restrictions apportées à l'interprétation de la mauvaise relation Th-K<sub>2</sub>O (Chapitre VI), on peut penser que le fait que la liaison Fer-K<sub>2</sub>O soit meilleure que la liaison Fer-Th étaye les hypothèses liées à l'influence du lessivage.

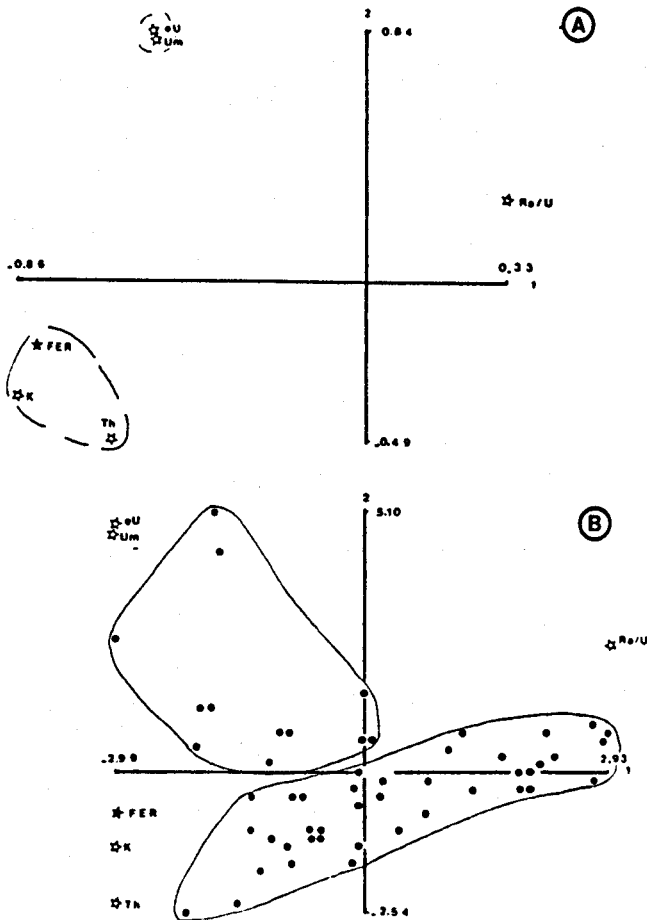


Fig. 195 : A.M. IV, % FER

A. position des variables dans le plan F1 - F2

B. position des individus

7.4.5. TRAITEMENT V : VARIABLES RADIOMETRIQUES, ILLITE, FER, M.O.D.

Trois facteurs (F1, F2, F3) traduisent 76,26 % de l'information (F1+ F2 = 61,09 %). En figure 196, on trouvera les principaux résultats. On dégage trois pôles principaux : le pôle détritique (Fer, Th, K<sub>2</sub>O) (facteur F1), le pôle argileux (Ill, I/C) (facteur F3) et le pôle Uranium (eU,Um) facteur F2). La M.O.D. se place à mi-distance du pôle détritique et du pôle Uranium, traduisant ainsi son rôle dans la fixation de l'Uranium et son origine détritique.

Si on considère la position des individus dans le plan F1-F2 (fig. 196), il semble que l'on puisse distinguer deux groupes (éventuellement trois) :

- groupe 1 : échantillons influencés par le pôle détritique et dont on peut dire que leur uranium est associé au fer;
- groupe 2 : échantillons influencés par les pôles argile et fer. Leur Uranium est associé aux Illites et au Fer (ainsi qu'à moindre égard, à la M.O.D.);
- groupe 3 : (éventuel) : échantillons très anomaux (P.A.O. 016, 52 ppm d'Um). Leur Uranium semble être lié à la M.O.D., mais il se peut que les argiles et le fer aient une part d'influence.

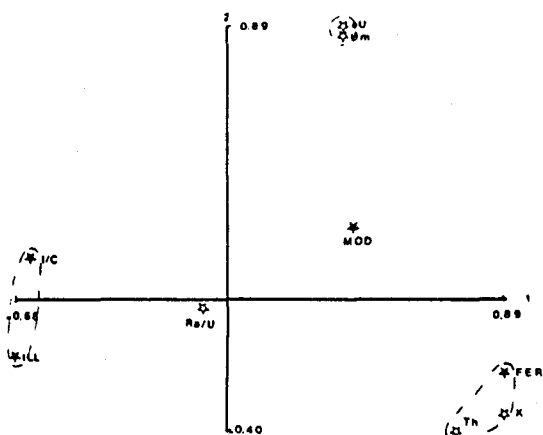
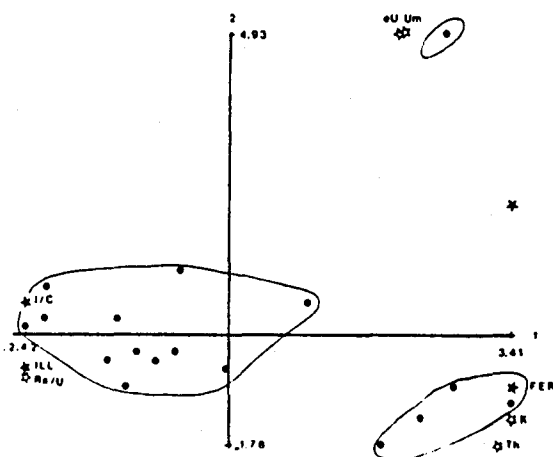


Fig. 196 : A.M. V des roches  
(toutes variables)

A. position des variables  
dans le plan F1 - F2



B. position des individus



4<sup>eme</sup> PARTIE

CONCLUSIONS





## QUATRIÈME PARTIE

### CONCLUSIONS GENERALES

#### I. PRINCIPAUX RESULTATS

##### I.1. RADON

La détection du Radon, notamment dans les eaux de source, a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- pour la première fois en Belgique, la méthode de détection du Radon dans les eaux naturelles a été appliquée avec succès dans le cadre d'une prospection;
- la mise au point de la méthode a permis de mettre en évidence sa fiabilité et sa sensibilité;
- des anomalies en Radon, nouvelles, ont été mises en évidence (3) dans la région d'Oizy;
- la comparaison avec une autre méthode d'analyse du Radon dans les eaux appliquée par l'Institut d'Hygiène de Bruxelles a permis de confirmer la réalité des anomalies en Radon, de montrer que la présence de Radon dans ces eaux n'est pas liée à celle du Radium et d'étalonner le système de mesure utilisé en prospection;
- l'étude des fluctuations des teneurs en Radon en fonction des variations climatiques a montré que :
  - . la pluviométrie est en relation inverse avec la concentration en Radon (effet de dilution);
  - . la pression atmosphérique semble influencer positivement sur les émanations.
- l'application des techniques gaz à Oizy (étude des sources, charbon actif dans les sols, émanométrie) a permis la mise en évidence de la prolongation orientale de la zone faillée observée dans la carrière et de la présence d'un "dôme" Radon centré sur la carrière;
- ces mêmes techniques ont montré l'existence d'une série d'anomalies Radon en sol ou dans les sources alignées depuis Monceau jusque Six Planes suivant le contact du Gédinnien inférieur et supérieur.

##### I.2. L'ANOMALIE EN URANIUM OIZY-R.O.B.

Les diverses études menées sur le site d'Oizy-R.O.B. et sur les échantillons qui en proviennent, ont mis en évidence :

- la liaison entre les anomalies radiométriques et un réseau de fractures, les concentrations en radioéléments se faisant principalement dans les fractures de direction Est-Ouest;
- l'absence à l'échelle régionale d'anomalies stratiformes analogues à celles mises en évidence dans la région de Chiny (synclinal de Neufchateau) par J.M. CHARLET et L. DORCHIES.

Les études en laboratoire\* montrent que :

- le principal radioélément responsable des anomalies est l'Uranium. Ce dernier est en net déséquilibre dans les remplissages de fractures limonitiques;
- il existe une différence de comportement de l'Uranium au sein des remplissages et au sein des roches (lessivage subactuel de l'Uranium dans les fractures);
- dans les remplissages comme dans les roches, les oxydes de fer jouent un rôle important dans la fixation de l'Uranium;
- l'Uranium présent dans les sédiments est diffus, les autoradiographies ne montrent pas de concentration d'impacts localisée préférentiellement sur tel ou tel site. Ils sont uniformément répartis au sein des oxy-hydroxydes de fer;
- dans les remplissages, l'Uranium apparaît associé au fer colloïdal et aux hydroxydes de fer exprimés (bonne corrélation  $U_m$  - Cristallinité de la Lépido-crocoïte);
- dans les épontes, la teneur en Uranium évolue parallèlement à celle du fer, elle diminue lorsque l'on "pénètre" dans la roche;
- dans les roches comme dans les remplissages, il semble que l'Illite joue un rôle fixateur pour l'Uranium, de même que la M.O.D. pour les roches uniquement.

Les études statistiques (diagramme Th-U-K et analyses multivariées) indiquent que :

- la concentration en Uranium est indépendante de celle en Th et  $K_2O$ ,
- l'Uranium est secondaire (épi ou supergénétique),
- le Thorium et le Potassium sont assez mal corrélés (influence probable du lessivage),
- les droites Th- $K_2O$  ont une assez forte ordonnée à l'origine due à la présence de Thorium détritique dans les sédiments du Gédinnien inférieur,

---

\* Spectrométrie gamma, Spectrométrie alpha, Anticoïncidence, Autoradiographie, Diffractométrie des rayons "X", Dosage du fer,

- l'Uranium présent dans les alluvions est indépendant du Radon des sources,
- pour les remplissages de fracture, il existe un pôle Uranium associé au fer, à la cristallinité de la Lépido-cro-cite, à l'Illite, confirmant ainsi les résultats déjà acquis. Il y existe un pôle détritique formé par le Thorium et le Potassium,
- pour les roches on distingue trois pôles: l'Uranium, le pôle détritique (Th, K<sub>2</sub>O, Fer), les Argiles (Ill. I/C). La M.O.D. se "partage" entre l'Uranium et le pôle détritique.

A partir de l'ensemble de ces résultats, on peut proposer le modèle de concentration et de remobilisation subactuelle présentés dans le paragraphe suivant.

## II Modélisation DU TYPE DE CONCENTRATION ET DE REMOBILISATION DE L'URANIUM DANS LE CONTEXTE D'OIZY

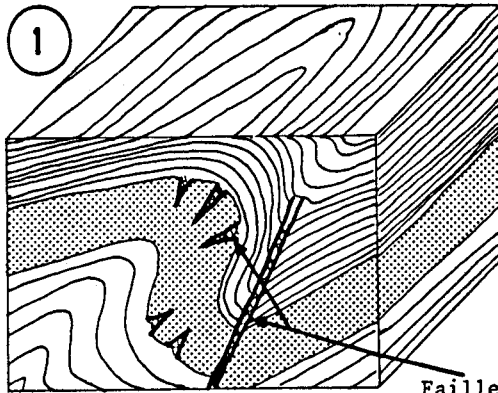
On peut résumer la façon dont se sont déroulées les différentes étapes à l'aide de quelques schémas (fig. 197). La chronologie présentée ne peut être que relative, en effet, il n'y a pas actuellement d'éléments qui puissent permettre de donner une chronologie absolue des événements. Notamment, à propos des oxy-hydroxydes de fer, On connaît des concentrations ferrugineuses dues à des oolithes ferrugineuses du Trias et du Jurassique, L. VOISIN (1982) attribue des couches ferrugineuses encroûtantes au Rhétien. M.G. BONHOMME (1982), dans un cadre plus général, attribue un âge jurassique à des argiles accompagnant des minéralisations filoniennes localisées dans le socle hercynien. On sait, en outre, que la période Eocène-Miocène a vu l'Ardenne soumise à un climat tropical à subtropical, continental, favorisant le développement de sols limonitiques (A. MISERY, 1982).

La présence de Kaolinite au sein des fractures peut faire pencher en faveur d'un âge Eocène-Miocène pour leur remplissage. On connaît en effet des gisements de Kaolinite de cet âge en Ardenne (L. VOISIN, 1982).

Le mode de fixation de l'Uranium sur les oxy-hydroxydes de fer est à rapprocher de celui des divers auteurs déjà cités (GUILLET *et al*, 1976; MICHEL, 1981; GUENIOT *et al*, 1982). L'Uranium se fixe dans la frange amorphe des oxy-hydroxydes de fer, il s'adsorbe sur les minéraux à grande surface spécifique (Lépido-cro-cite). J'explique l'incorporation de l'Uranium à la structure des hydroxydes de fer au cours de la transformation de la Lépido-cro-cite en Goethite, par mise en solution (SCHWERTMANN et TAYLOR, 1972).

On a donc vu, à partir de l'exemple d'Oizy, comment l'Uranium a été concentré dans des remplissages limonitiques de fractures localisées dans le Gédinnien inférieur. Ces fractures sont particulièrement bien développées dans les Quartzophyllades de Braux. Il est parfaitement envisageable que le cas de la carrière d'Oizy et de la

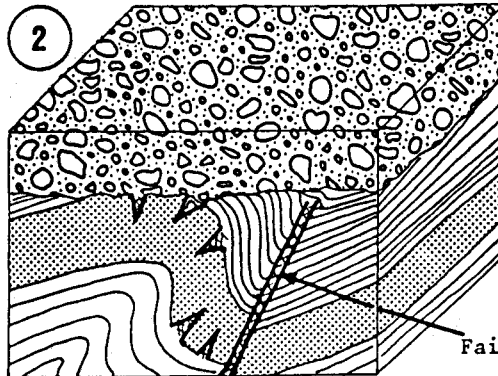
Fig. 197 : Modélisation du mode de concentration et remobilisation de l'Uranium dans un site de type-Oizy.



← Schistes d'Oignies et St Hubert.  
← Grès et Quartzophyllades de Braux.  
← Phyllades de Levrézy.

1. Etat du substratum paléozoïque en fin de période hercynienne. Les bancs les plus cassants sont fortement fracturés et faillés.

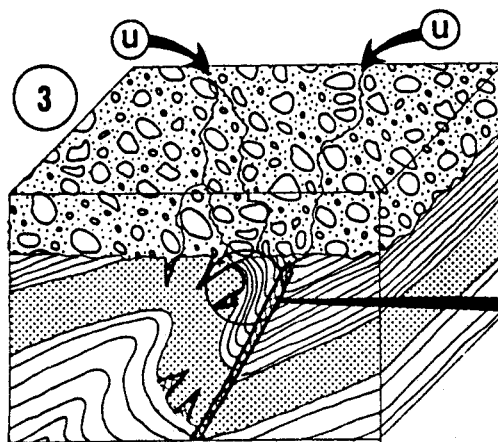
Failles et fractures 1.-- Période d'érosion post-hercynienne → 2.



← Sol établi en période continentale, sous climat tropical à subtropical. Mobilisation du fer, il percole avec les eaux oxydantes le réseau de fractures. Développement des oxy-hydroxydes de fer qui encroûtent les mylonites. Développement dans ce contexte de minéraux issus de l'altération : Kaolinite Interstratifiés.

Faille limonitisée.

2. -- Apport d'Uranium ---> 3.



L'origine de l'Uranium est inconnue :

- venues supergènes dues à une activité volcanique
- venues supergènes dues à l'érosion de zones proches, anomales en U (Siegenien)

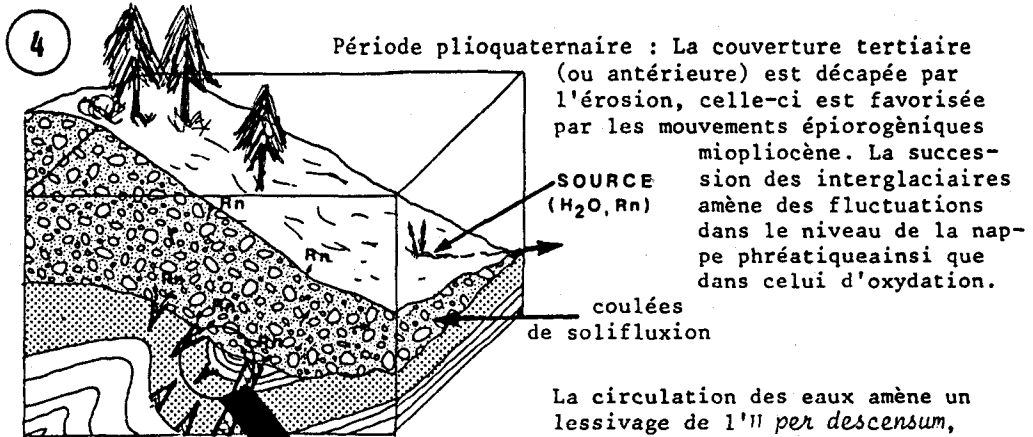
L'Uranium est transporté *per descensum* à partir de la surface.

Le fer oxydé bloque l'U sur la frange amorphe des oxy-hydroxydes de fer, sur les

minéraux à grande surface spécifique :

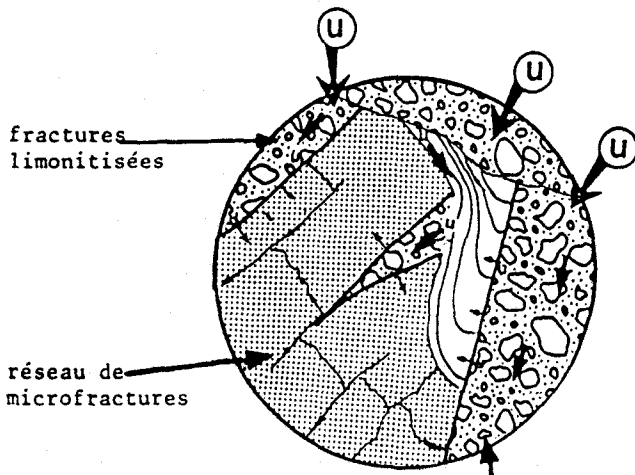
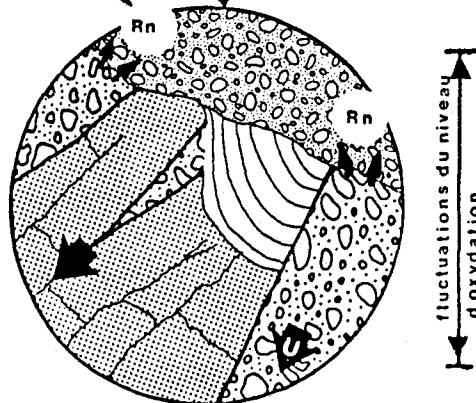
- Lépidocrocite,
- argiles ( Illites altérées ).





Les émanations de Rn sont détectées par des charbons actifs, émanométrie, analyse des eaux de source.

La circulation des eaux amène un lessivage de l'U *per descensum*, notamment de l'<sup>234</sup>U plus facilement solubilisable que l'<sup>238</sup>U qui est aisément complexé. Au niveau de la roche la liaison Uranium - piège est plus forte, aucun échange tangible ne se produit.



Percolation des fluides chargés en U dans le matériel perméable de la couverture. Le réseau de fractures voit se développer une circulation de ces fluides. Les épontes de fractures, les miroirs de failles sont donc au contact de l'U. Il se fixe sur les oxydes de fer, les grains de matière organique et les Illites contenus dans les roches. Dans les faciès les plus pelitiques la schistosité S, favorise la circulation des fluides.

R.O.B. ne soit pas unique. Il est donc possible que les anomalies en Radon décelées en prospection hydrochimique soient générées par de telles fractures présentes sous la couverture plioquatenaire. Il est d'autant plus tentant d'envisager cette hypothèse que les anomalies de Monceau, Six Planes et du Rouvelet-les Maissonnettes semblent s'aligner sur le contour de la formation de Braux.

### III. PROBLEMES ET PERSPECTIVES

Ils sont de deux ordres. Il y a ceux qui sont à rattacher au mode d'analyse des eaux de source et ceux qui sont directement liés à la poursuite de la prospection et à son interprétation.

J'ai déjà dégagé en 2ème partie, chapitre III, un certain nombre de voies d'études ouvertes par la prospection hydrochimique. Il faudrait préciser les études faites sur les variations des résultats en fonction des conditions d'analyse (température d'extraction, répétitivité de la mesure). Les études en liaison avec les variations climatiques sont à poursuivre afin de les confirmer. Notamment une période de surveillance plus longue serait intéressante ainsi que des mesures plus nombreuses dans un laps de temps assez bref.

Afin de déterminer l'origine du Radon dans l'eau, il y aurait deux études à mener : un dosage de l'Uranium présent dans cette eau, une étude hydrogéologique de chaque site anomal en Radon. Cette dernière étape pourrait permettre d'envisager avec certaines chances de succès des mesures de spectrométrie gamma in situ et peut-être l'implantation de petits sondages.

Il résulte de notre interprétation de l'anomalie d'Oizy que l'Uranium est drainé vers le bas du réseau de fractures depuis la mise en place de la couverture plioquatenaire (au moins). Il est donc possible qu'une concentration en Uranium se soit établie à Oizy dans des pièges plus profonds présents dans les formations qui sont sous l'excavation actuelle de la carrière ou dans d'autres zones situées sous le chapelet d'anomalies Radon mises en évidence le long du contact Gédinnien inférieur-Gédinnien supérieur.

On peut opposer à cette hypothèse une autre théorie. Les anomalies de la carrière d'Oizy pourraient être attribuées de prime abord à la zone oxydée d'un réseau filonien minéralisé. Dans ce cas de figure, l'Uranium ne serait pas concentré per descensum mais per ascensum à partir d'une source hypothétique. JEDWAB envisage ce type d'hypothèse pour interpréter la genèse de l'indice de Daverdisse, situé plus au Nord à la limite Gédinnien-Siégenien. Un certain nombre d'arguments semble rendre ce cas de figure peu probable dans le cas d'Oizy. On n'observe pas de minéraux secondaire d'Uranium mais uniquement de l'Uranium fixé sur les oxyhydroxydes de fer, la M.O.D., les Illites.





de sulfures (mises à part quelques pyrites) ou d'expressions minéralogiques oxydées de minéraux sulfurés dans les fractures.

On observe un fort étalement des anomalies en Radon à l'échelle régionale, principalement au niveau du contact stratigraphique Gédinnien inférieur-Gédinnien supérieur.

Ces arguments ne militent pas en faveur d'une hypothèse hydrothermale pour la genèse des anomalies mais plutôt pour une origine supergène de l'Uranium.

L'origine de cet Uranium reste à déterminer. On peut avancer des hypothèses mais il n'existe pas actuellement de faits indiscutables. L'une des plus séduisantes est de voir comme source possible les horizons porteurs d'Uranium, concentrés syngénétiquement et remobilisés secondairement, décrits dans le Siégénien du bassin de Neufchateau (L. DORCHIES, 1984). J.M. CHARLET a observé dans l'anticlinal de l'Ardenne au niveau d'Alle/Semois de légères anomalies radiométriques qui se développent dans les mêmes formations.

Les tectoniciens admettent le charriage du Synclinorim de Neufchateau sur l'anticlinal de l'Ardenne au niveau de la faille d'Herbeumont. On peut penser que les formations siegéniennes qui couvraient le Gédinnien de la région d'Oizy ont été érodées libérant ainsi l'Uranium qu'elles renfermaient, permettant la formation des concentrations per descensum étudiées dans ce mémoire.

Dans la Haute Ardenne, on distingue deux types d'anomalies uranifères :

- celles renfermant des minéraux d'Uranium exprimés (Chiny - La Vierre et Daverdisse);
- celles où l'Uranium est diffus (Oizy).

Le type de genèse de ces anomalies est différent, parfois sujet à controverses. L'anomalie de Chiny, dans le bassin de Neufchateau, est développée dans des strates schistogréseuses et gréseuses du Siégénien inférieur. Elle est liée à une préconcentration synsédimentaire suivie d'une précipitation suivant de multiples fronts d'oxydo-réductions. Cette reconcentration de l'Uranium serait contemporaine d'une phase continentale post-hercynienne (CHARLET *et al*, 1984).

Selon DEJONGHE *et al*, (1982), l'Uranium de l'indice de Daverdisse, situé au niveau de la limite Gédinnien-Siegénien, est d'origine distale. Sa concentration résulte de "la conjonction, à la faveur d'une faille transversale, d'une zone de perméabilité de fracture et d'un écran imperméable ménagé par le décalage le long de la faille d'un niveau plus schisteux". Ces auteurs tendent pour une origine supergène de l'Uranium alors que d'autres (JEDWAB) avancent une hypothèse hydrothermale dont l'origine reste hypothétique.

L'anomalie d'Oizy se développe, elle, dans un réseau de failles et fractures dont le remplissage limonitique constitue un piège pour l'Uranium supergène.

Dans un premier temps, il se fixe sur ces derniers puis "contamine" les roches incombantes schistogréseuses et très microfracturées. Dans un second temps, le lessivage subactuel fait descendre l'Uranium dans des zones plus profondes où il pourrait être concentré dans d'autres pièges.



**BIBLIOGRAPHIE**





- ADAMS J.A.S. et WEAVER C.E. (1958).- Thorium to uranium ratios as indicator of sedimentary processes : exempls of concept of geochemical facies. *Bull. of A.A.P.G.*, vol. 42, n.2, p. 387-430, 18 fig.
- ALEXANDRE J. (1976).- Les surfaces de transgression exhumées et les surfaces d'aplanissement in "Géomorphologie de la Belgique". *Mém. Laboratoire Géol. et Géogr. Phys.*, Univ. Liège, p. 75-92.
- ALEXANDRE-PYRE S. et KUPPER M. (1976).- L'évolution des rivières in "Géomorphologie de la Belgique". *Lab. Géol. et Géogr. Phys.*, Univ. Liège, p. 51-74.
- ASSELBERGHS E. (1946).- Le Gédinnien in L'Eodévonien de l'Ardenne et les régions voisines. *Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain*, t. XIV, Chap.III.
- ASSELBERGHS E. (1954).- L'Eodévonien de l' Ardenne in Prodrôme d'une description géologique de la Belgique. *Hommage de la Soc. Géol. Belgique*, p. 83-117.
- 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. Sc. Départ. Mines Géol.*, p. 9-29.
- BASHAM I.R. (1981).- Some applications of autoradiographs in textural analysis of uranium bearing samples. a discussion. *Economic Geology*, vol. 76, p. 974-982.
- BASHAM I.R. et EASTERBROOK G.D. (1977).- Alpha-particle autoradiography of geological specimens by use of cellulose nitrate detectors. *Inst. Min. Metallurgy Trans.*, 86, B, p.96-97.
- BASHAM I.R., BALL, BEDDOE et McMICHIE (1982).- Uranian-bearing accessory mineral and granitic fertility. II. Structures of granites from the British Isles. in "Les méthodes de prospection de l'Uranium". *O.C.D.E.*, p. 398-413.
- BEUGNIES A. (1961).- Etude du massif de Givonne. *C.R. session Extraordin. de la S.G.B.*
- BEUGNIES A. (1963).- Le Massif Cambrien de Rocroi. *Bull. Serv. Carte géol. de la France*.
- BEUGNIES A. (1982).- Structure de l'aire anticlinale de l'Ardenne à l'Est du méridien de Libramont. *Ann. S.G.N.*, T. CII.
- BEUGNIES A. (1984).- Quelques commentaires sur la présence d'Albites de haute température dans les sédiments du Dévonien inférieur de l'aire anticlinale de l'Ardenne. *Commun. orale à la séance extraordinaire de la S.G.N.*, Mons.
- BEUGNIES A. et WATERLOT G. (1965).- Carte géologique de la France au 1/50.000. Feuille de Fumay. Ed. BRGM.
- BLANQUART P. (1974).- Etude comparative de différents types de M.O. inclus dans des sédiments du Bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais. *D.E.A.*, Lille.
- BLESS M.J.M., BOUCKAERT J., PAPROTH E. (1980).- Pre-Permian Brabant massif in Belgium, the Netherland and Germany. *Meddelingen rijks geologische dienst* , vol. 32, 1-14.
- BOLLE J.M. (1981).- Etude géochimique et radiométrique d'un niveau de schiste noir du Revinien supérieur au bord sud du massif de Stavelot. *Mém. Licence Sci. Geol. et Min.*, Louvain la Neuve.

- BONHOMME M.G. (1982).- Age triasique et jurassique des argiles associées aux minéralisations filoniennes et de phénomènes diagénétiques tardifs en Europe de l'Ouest. Contexte géodynamique et implications génétiques. *C.R. Acad. Sc.*, t. 294, p. 521-525.
- BOUKO Ph. (1984).- The Nato Workshop 243/84. Seismic activity in Western Europe with particular consideration to the Liège Earth quake of November 8, 1983.
- BROUSMICHE (1985).- Communication personnelle de données météorologiques de la période du 3-12/ 1984.
- BULLETIN DE L'OFFICE ROYAL DE METEOROLOGIE DE BELGIQUE de janvier à décembre 1984.
- CAMERON E.M. (1980).- Geochemical exploration for uranium in Northern Lakes. *J. Geoch. Explor.*, 13, p. 221-250.
- CANTILLANA R. (1985).- Préparation des échantillons en vue d'analyse en spectrométrie alpha. Communication personnelle.
- CHARLET J.M. (1984).- Les gîtes minéraux de l'Ardenne. in "Le Grand Livre de l'Ardenne et Gaume". *La Nature et l'Homme*, Ed. DUCLOT.
- CHARLET J.M., DUPUIS Ch. (1981).- Thermoluminescence et Techniques Gaz Contrat CCE-009-79-1-EXUB/MP/CE/1. Rapport final.
- CHARLET J.M., DRUMEL, QUINIF, YANS (1982).- Conversion des résultats d'une prospection radiométrique autoportée en unité de concentration de radioéléments. *Ann. Soc. géol. Belgique*, t. 105, p. 195-203.
- CHARLET J.M., DEJONGHE L., DE WITTE S.M., DRUMEL B., HENRY J., HERBOSCH A., LEFIN J.P. et MARTIN H. (1983).- Reconnaissance Survey for Uranium in the Belgian Paleozoic. *Professional Paper*, 1983/1; n° 196.
- CHARLET J.M., DORCHIES L., QUINIF Y. (1984).- Découverte de minéraux uranifères dans le Siegénien du Synclinal de Neufchateau, Conséquences sur la signification des anomalies radiométriques du Dévonien inférieur de la Haute Ardenne. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 107, p. 1-13.
- CLARK *et al.* (1966).- Tableaux des clarkes, extrait de Gamma-Ray surveys in Uranium exploration. *Atomic-Energy Agency*, Vienne (1979). Technical reports n° 186.
- COLBEAUX J.P. (1974).- Mise en évidence d'une zone de cisaillement Nord-Artois. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 278, série D, p. 1159-1161.
- COLBEAUX J.P. (1977).- Géométrie et cinématique de la fracturation dans le Nord de la France. *Bull. B.R..G.M.*, section IV, n° 4, p. 339-355.
- DAHL A.R. et HAGMAIER J.L. (1974).- Genesis and characteristics of the southern Powder River Basin uranium deposits, Wyoming, USA. *I.A.E.A.*, Vienne, p. 201-218.
- DAHLKAMP (1980).- Typology and geographic/Geotectonic distribution of Uranium deposits. *I.F.P.*, vol. XXXV, n° 3.
- DEFPEYES K. et MacGREGOR I. (1980).- Comment estimer les ressources mondiales en Uranium ? *Pour la Sciences*, n° 29, p. 72-83.
- DEGENS E.T., KHOO F. et MICHAELIS W. (1977).- Uranium anomaly in Black Sea sediments. *Nature*, 269, p. 566-569.
- DEJONGHE L., CHARLET J.M. et DUPUIS Ch. (1982).- L'anomalie radioactive de Daverdisse et les minéraux uranifères associés. *Ann. S.G.B.*, 12/ 1982, t. 105.

- DENIS L.J. (1984).- Radioactivité : les petites doses de tous les jours font-elles un total dangereux ? *Sciences et Vie*, n°800, p. 24-37.
- DIOULY-OSSO P. et CHAUVET R.J. (1979).- Les gisements d'Uranium de la région de Franceville (Gabon). *I.A.E.A.-A.G.* 109/7, p. 123-147.
- DISNAR J.Q. et TRICHET J. (1983).- Simulation expérimentale de la diagenèse de complexes organométalliques. Implications métallogéniques. *C.R. Ac. Sc.*, t. 296, Série II, p. 631-634.
- DORCHIES L. (1984).- Les anomalies uranifères dans le Siegénien du Synclinorium de Neufchateau (Ardenne, Belgique) : Prospection Sédimentologie, Géochimie. *Thèse III<sup>e</sup> Cycle*, Lille, 245 p.
- DUANES M.J. et WILLIAMS G.T. (1980).- Some applications of autoradiographs in textural analysis of uranium. Bearing samples. *Economic Geology*, vol. 75, p. 766-774.
- DUNOYER DE SEGONZAC G. (1969).- Les minéraux argileux dans la diagenèse, passage au métamorphisme. *Mém. Serv. Carte Géol. Als.Lorr.*, n° 29, 320 p.
- DYPVIK H. and BUE B. (1984).- The U, Th and K distribution in Black shales of the Junnsfjellet formation, Svalbard, Norway. *Chemical Geology*, 42, p. 287-296.
- EK C. et OZER A. (1976).- Les dernières transgressions marines. *Lab. Géol. et Géographie Phys.*, Liège, p. 9-16.
- EULRY M.J. et VARGAS J.M. (1980).- Les paléosurfaces et leur métallogénie. Le rôle des altérations anté-liasiques dans la métallogénèse de la périphérie du Mont Lozère (France). Cas de l'Uranium. *Mém. B.R.G.M.*, n°104, p. 16-116.
- FERNANDEZ POLO J.A. (1970).- Genesis de los yacimientos uraniferos en metasedimentos de Salamanca (España). *I.A.E.A.*, Vienne, p. 243-252.
- FUCHS Y. (1976).- A propos de quelques exemples de relation entre altérations et concentrations métallifères. (Pb, Zn, Ca, U, Ba, Sr, F ...) dans le domaine épi-continentale. *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVIII, n°1, p.91-94.
- GANGLOFF A. (1970).- Notes sommaires sur la géologie des principaux districts uranifères étudiés par le C.E.A.. *Uranium Exploration Geology*, I.A.E.A. PL. 391/16, 77/105.
- GAUTHIER M. (1961).- Contribution à la géochimie de l'Uranium des roches sédimentaires et en particulier des schistes carbonifères. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, t 14, fasc. 4 , pp 179 - 208 .
- GIBLIN, BATTIS et SWAINE (1981).-Laboratory simulation studies of uranium mobility in natural waters. *Geochemica et Cosmochemica Acta*,45, p.699-709.
- GOSSELET J. (1888).- L'Ardenne. *Mémoire de la Carte géologique de France*.
- GOGUEL J. (1980).- Carte géologique de la France et de la marge continentale à l'échelle de 1/1500 000. *B.R.G.M.*.
- GRANDSTAFF D.E. (1976).- Akinetic study of the dissolution of uraninite. *Economic Geology*, 71, (8), p.1493-1506.
- GRANIER C. (1973).-Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères. Ed. MASSON, 143 pages.
- GRUTT E.W. (1972).- Prospecting criteria for sandstone-type uranium deposits. *Uranium Prospect. Handbook*, London, 47/77.



- GUENIOT B., GUILLET B., SOUCHIER B. (1982).- Fixation de l'Uranium sur les surfaces d'oxyhydroxydes de fer (Lépidocrocites) des horizons placiques des sols hydromorphes : exemple des stanogleys des Vosges cristallines. C.R. Ac. Sc., t. 295, série II.
- GUILLET B., ROUILLER J., SOUCHIER B. (1976).- Accumulations de fer (lépidocrocite) superposées à des encroûtements ferri-manganiques dans des sols hydromorphes vosgiens. *Bull. S.G.F.*, (7), t. XVIII, n°1, p. 55-58.
- HARSHMAN E.H. (1974).-;Distribution of elements in some roll type Uranium deposits. *I.A.E.A.*, Vienne, p. 169-183.
- HASSAN et HOSSIN (1975).- Contribution à l'étude des comportements du Thorium et Potassium dans les roches sédimentaires. C.R. Ac. Sc., t. 280, p. 533-535.
- HERBOSCH A. (1974).- Facteurs controlant la distribution des éléments dans les shales uranifères du bassin permien de Lodève (Hérault, France). *In Formation of Uranium ore deposits*, Vienne.
- HOLTZAPFFEL J. (1981).- Minéralogie des argiles dans les roches anté Crétacé supérieur d'Orthrys (Grèce). *D.E.A.*, Lille, 52 p.
- JEDWAB J. et DEJONGHE L. (1982).- Contribution à l'étude minéralogique de l'indice radioactif de Daverdisse. *Bull. Soc. belge Géol.*, t. 91, fasc. 4, p. 217-233.
- KLUSMAN R.W. et WEBSTER J.D. (1981).- Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earth quake prediction. *Bull. of the Seismological of America*, vol. 71, n°1, p. 211-222.
- E.R. LANDA et R.G. GAST (1973).- Evaluation of cristallinity in hydrated ferric oxides. *Clay and Clay Minerals*, vol. 21, p. 121-130.
- LANGMUIR D. (1978).- Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 42, p. 547-569.
- LANGMUIR D. et HERMAN J.F. (1980).- The mobility of Thorium in natural waters at low temperatures. *Geochemica et cosmochimica Acta*, 44, p. 1763-1764.
- McLAUGHLIN J.P., CHARLET J.M., DUPUIS Ch., QUINIF Y., BOUKO Ph. et RAMU J.P. (1982).- An intercomparison of several methods of detecting Radon-222 in overburden gases. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 105, p. 221
- LAURANT A. (1976).- La formation du réseau hydrographique de la Belgique. *Lab. Géol. et Géogr. Phys.*, Liège, p. 29-50.
- LECOMPTE P. (1975).- Géochimie de la surface du Cambrien et de l'Eodévonien dans les bassins de la Lomme et de la Lesse supérieures. *Doct. Univ. Catholique de Louvain (Belgique)*.
- LEVEQUE P.C., MAURIN C., SEVERAC J. (1972).- Le  $^{222}\text{Rn}$ , traceur naturel complémentaire en hydrologie souterraine. C.R. Ac. Sc., Série D, p. 2293-2296.
- MARTIN H. (1983).- Stream sediment geochemistry in "reconnaissance survey for Uranium in the belgian Paleozoic". *Professional Paper*, n° 196.
- MARTIN J.A. (1962).- Répartition de l'Uranium entre les parties organiques et minérales d'un schiste uranifère. *Bull. S.G.F.*
- MARTIN-CALVO M. (1974).- Consideraciones sobre el papel que desempeñan las sustancias organicas naturales de caracter humico en la concentracion del uranio. *I.A.E.A.*, p. 125-135.
- MEILLIEZ F. (1983).- La formation de Fépin (Gédinnien de l'Ardenne), un marqueur régional lithostratigraphique et structural. *Ann. S.G.N.*, t. CIII, p. 37-53.
- MERCIER M., QUINIF Y., DUPUIS Ch. (1982).- Minéraux argileux et géochimie des radioéléments (U-Th-K) du Tertiaire belge (sondage de Mol.). *R.A.S.T.*, p. 432.

- MICHEL D. (1981).- Modalités des liaisons Fe-U : le cas des concentrations ferrifères de St Pierre du Cantal (France). *C.R. Ac. Sc., Série II*, p.293.
- MICHOT P. (1980).- Belgique, Introduction à la géologie. *26° C.G.I., G. 16*.
- MISERY A.E. (1982).- Etude minéralogique et géochimique de quelques types de chapeaux de fer en Belgique. Contribution à l'établissement d'un guide de prospection par la recherche de gisement de Pb-Zn. *Thèse 3è Cycle, Paris VI*,
- MURRAY E.G. and ADAMS J.A.S.(1958).- Thorium, Uranium and Potassium in some sandstones. *Geochimica et cosmochimica Acta*, Vol. 13, p. 260-269.
- NAKASHIMA S., DISNAR J.R., PERRUCHOT A. (1983).- Etude expérimentale des mécanismes de concentration de l'Uranium par une matière organique sédimentaire dans des conditions de diagenèse croissante, premiers résultats. *C.R. Ac. Sc.*, t. 296, série II, p. 1425-1428.
- NDZIBA M. (1982).- Anomalies radiométriques des couches de passage du Viséen-Namurien dans le Bassin de Dinant (Ardennes, Belgique). *Thèse Doct.III° Cycle, Lille*.
- ODDOU A. (1981).- Mesures des variations de concentration du Radon dans le sol, relation avec la tectonique active (application aux Alpes maritimes). *Thèse III° Cycle, Nice*.
- ODDOU A., NAULT L., CAMPREDON R., BERNAT M. (1983).- Mesure continue des variations des émanations souterraines du Radon sur trois sites des Alpes Maritimes (France). Résultats préliminaires. *C.R. Ac. Sc., Paris*, t. 296, p. 1081-1086.
- PARFENOFF A. *et al.* (1970).- Les minéraux en grains. Méthode d'étude et détermination. *Ed. Masson*.
- PELISONNIER H. (1979).- Sur l'ampleur de l'altération supergène dans la formation des gîtes minéraux exploitables. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 102, p. 537-548.
- PELLERIN P. (1980).- Le contrôle des rejets radioactifs par la Santé Publique. *Annales des Mines*, p. 1-22.
- PICOT P. et JOHAN Z. (1982).- Atlas des minéraux métalliques. *Mém. B.R.G.M., n° 90*.
- PLILER R. et ADAMS J.A.S. (1962a).- The distribution of Thorium, Uranium and Potassium in the Mancos shale. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol. 26, p. 1115-1135.
- PLILER R. et ADAMS J.A.S. (1962b).- The distribution of Thorium and Uranium in a Pennsylvanian weathering profil. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol. 26N p. 1137-1166.
- POCHET R. (1982).- Dosimétrie de l'Hélium et du Radon dans l'eau et dans les sols saturés non consolidés. *Proc. Symp., Paris, O.C.D.E.*, p. 505-516.
- POMEROL Ch. et BABIN Cl. (1977).- Stratigraphie et Paléogéographie, Précambrien et Paléozoïque. *Ed. Doin*.
- QUINIF Y. (1984).- Détermination des coefficients de partage H<sub>2</sub>O-Rn et Toluène-Rn. *Communication personnelle*.
- QUINIF Y., CHARLET J.M., DUPUIS Ch. (1982).- Géochimie des radioéléments : U-Th-K<sub>2</sub>O dans les roches détritiques : une nouvelle méthode d'interprétation. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t.105.
- QUINIF Y., DOREMUS P., BOUKO Ph., CHARLET J.M. (1984).- Une méthode d'analyse du Radon -222 dans les eaux naturelles. Application à la prospection de l'Uranium (région d'Oizy, Belgique). *C.R. Ac. Sc., série D*, t. 299, n° 17, p. 1187-1190.
- RAMSTEDT E. (1911).- Sur la solubilité de l'émanation du Radium dans les liquides organiques. *"Le Radium"*, vol. 8, p. 253-256.
- REMY M.L., PELLERIN P. (1968).- Radioactivité naturelle de 250 sources hydrominérales françaises. *Bull. de l'I.N.S.E.R.M.*, t. 23, n° 1, p. 23-62.

- REMY M.L. , PELLERIN P. (1982).- Quelques données récentes sur la radioactivité naturelle des sources hydrominérales françaises. *Presse thermique et climatique*, 1982, n° 119, n° 3.
- ROUGEAUD J.N. (1979).- Etude structurale des matières carbonées associées à des minéralisations uranifères. *Thèse*, Orléans.
- ROSE A.J. (1970).- Tables et abaques. Radiocristallographie. C.N.R.S., 238 p.
- SAMAMA J.C. (1980).- Les paléosurfaces et leur métallogenèse (Présentation et analyse du thème). *Mém. B.R.G.M.*, n° 104, p. 7-13.
- SAMAMA J.C. (1982).- La pyritisation des fronts d'oxyde-réduction des gîtes d'Uranium : signification géochimique et caractérisation texturale. *Mineral. Deposits*, 17, p. 295-306.
- SANGUINETTI, OUMAROU, CHAUTRET (1982).- Localisation de l'Uranium dans les figures de sédimentation du grès hôte du gisement d'Akouta, République du Niger. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, t. 294, série II, n°8, p. 591-594.
- SEIDEL J.L. (1982).- Radon - Emanométrie appliquée à la géophysique interne. *Thèse III° Cycle*, Clermont-Ferrand, 81 pages.
- SCHROEDER G.L., KRAMER H.W., EVANS R.D. (1965).- Diffusion of Radon in several naturally occurring soil types. *Journ. of Geophys. Res.*, 70, n° 2.
- SCHWERTMANN et TAYLOR (1972).- The transformation of lepidocrocite to goethite. *Clay and Clay Minerals*, vol. 20, p. 151-158.
- SERRA O. (1979).- Mesure de la radioactivité gamma naturelle, diagraphies différées base de l'interprétation. *Bull. Cent. Rech. Expl.-Prod., Elf-Aquitaine*, t. 1, p. 123-143.
- STEPHAN H. et STEPHAN T. (1963).- Solibilities of Inorganic and organic compounds. *Pergamon Press*.
- SWINNE R. (1913).- *Zeitung physik - chemie*, 84, 1913, p. 348-352.
- TELFORD W.M. (1983).- Radon mapping in the search for Uranium. Ed. A.A. Fitch, p. 155-195.
- VOISIN L. (1982).- Données et questions actuelles de la géomorphologie en Ardenne occidentale. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. CII, 3è trimestre, p. 135-143.
- WATERLOT G. (1945).- L'évolution de l'Ardenne au cours des diverses phases de plissements calédoniens et hercyniens. *Bull. Soc. géol. France*, 5è série, t. XV.
- WATERLOT G. (1974).- Le Paléozoïque du Nord de la France et de la Belgique (Ardenne et Boulonnais). *Géologie de la France*, Doin Ed., p. 42-62.
- WATERLOT G., BEUGNIES A., BINTZ J. (1973).- Ardenne-Luxembourg. Guide Géologique régional. *Masson Ed.*



TABLE DES MATIERES





## PREMIERE PARTIE

pages

### CHAPITRE I

Carte de situation des principaux indices uranifères (d'après G. WATERLOT, 1974; J.M. CHARLET, 1984) .....	13
---	----

### CHAPITRE II

Fig. 1	Classification des gisements d'uranium à partir de leurs origines (exemples) .....	18
Fig. 2	Gisements d'origine supergène. Schématisation .....	19
Fig. 3	Système U-O <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O à 25°C et 1 atm (d'après HOSTETLER et GARRELS, 1962) .....	21
Fig. 4	Phases principales de l'Uranium dans une solution simple d'eau (d'après CAMERON, 1980) .....	22
Fig. 5	Concentration en radioéléments de quelques types de sédiments et moyenne de l'écorce terrestre (d'après CLARK <i>et al</i> , 1966).....	23
Fig. 6	Schématization des conditions de dépôt d'un gisement lié à une altération supergène (cas des gisements de la région de Salamanque, Espagne) .....	28
Fig. 7	La famille de l'Uranium 238 Z = nombre atomique; N = nombre de masse .....	30
Fig. 8	Schématization de la genèse d'une auréole de Radon : n est fonction des conditions de migration .....	31
Fig. 9	Concentration relative du Radon dans le sol en fonction de la profondeur pour 3 vitesses de circulation (d'après SCHROEDER <i>et al</i> , 1965) .....	33

### CHAPITRE III

Fig. 10	Situation du domaine d'étude, grands traits structuraux du Paléozoïque belge d'après P. MICHOT (1980) .....	41
Fig. 11	Carte géologique de l'anticlinal de l'Ardenne d'après A. BEUGNIES (1982) .....	42
Fig. 12	Paléogéographie de l'Europe du Nord-Ouest au Dévonien d'après POMEROL, BABIN (1977), MICHOT (1980), GOGUEL (1980) .....	45
Fig. 13	Lithostratigraphie du Gédinnien inférieur .....	46
Fig. 14	Formation de Fépin à Naux (MEILLIEZ, 1983) .....	48
Fig. 15	Schématization de la disparition du Gédinnien inférieur à l'Est du massif du Serpont d'après E. ASSELBERGHS (1946) .....	48
Fig. 16	L'aire anticlinale de l'Ardenne. Eléments structuraux (in A. BEUGNIES, 1982) .....	50

Fig. 17	Stratification associée au plissement de l'axe anticlinal de l'Ardenne. Stéréogramme réalisé sur 300 mesures .....	51
Fig. 18	Carte géologique schématique de la région de Bohan-Orchimont d'après A. BEUGNIES et G. WATERLOT (1965) et A. BEUGNIES (1982) .....	52
Fig. 19	Stratification associée au plissement dans la partie occidentale du secteur d'étude (180 mesures) .....	52
Fig. 20	Carte géologique schématique de la région Oizy-Monceau, d'après A. BEUGNIES et G. WATERLOT (1965) et A. BEUGNIES (1982) .....	53
Fig. 21	Stratification associée au plissement dans la partie orientale du secteur d'étude (150 mesures) .....	54
Fig. 22	Orchimont : direction de fracturation : a : stéréogramme; b: rosace .....	55
Fig. 23	Région d'Oizy, direction de fracturation a : stéréogramme; b : rosaces .....	58
Fig. 24	Etirement Nord-Sud des méandres actuels et des méandres recoupés de la Semois en relation avec la direction Est-Ouest de la schistosité (Equidistance : 40 m) in ALEXANDRE-PYRE <i>et al</i> , 1976 .....	60

## DEUXIEME PARTIE

### CHAPITRE I

Fig. 25	Concentrations moyennes en radioéléments enregistrées lors de la prospection autoportée du Dévonien inférieur .....	67
Fig. 26	Carte des anomalies radiométriques mises en évidence lors de la prospection autoportée de l'anticlinal de l'Ardenne (extrait de CHARLET <i>et al</i> , 1983) .....	68
Fig. 27	Enregistrement de l'anomalie d'Oizy .....	69
Fig. 28	Anomalie d'Oizy - Conversion des données de l'autoportée en teneurs de radioéléments a : tableau des teneurs; b : situation des points de mesure.....	70
Fig. 29	Situation géologique des anomalies décrites .....	72

### CHAPITRE II

Fig. 30	Solubilité du Radon dans l'eau et dans le Toluène (H. STEPHENS <i>et al</i> , 1963) .....	77
Fig. 31	Activités comparées du Radon dans l'eau et dans le Toluène (Y. QUINIF, 1984) .....	77
Fig. 32	Méthodologie de séparation du Radon .....	78
Fig. 33	Anomalie d'Oizy : situation géographique et géologique .....	80



Fig. 34	Activités des sources de Monceau. Mai 1984, comparaisons avec S 8 (Oizy) et S 36 (bruit de fond) .....	81
Fig. 35	Anomalie de Monceau : situation géographique et géologique .....	82
Fig. 36	Activités des sources du Rouvelet-Les Maissonnettes en mai 1984. Comparaison avec S 8 (Oizy) et S 36 (bruit de fond) .....	83
Fig. 37	Anomalie du Rouvelet-Les Maissonnettes : situation géographique et géologique .....	84
Fig. 38	Activités des sources de Six Planes en mai 1984. Comparaison avec S 8 (Oizy) et S 36 (bruit de fond) .....	85
Fig. 39	Anomalie de Six Planes : situation géographique et géologique .....	86
Fig. 40	Anomalie de Chertiri : situation géographique et géologique .....	88
Fig. 41	Emanomètre (principe) .....	89
Fig. 42	Principe de l'implantation des boukoals .....	90
Fig. 43	Oizy : situation des 4 profils de boukoals .....	90
Fig. 44a	Oizy, profil P <sub>1</sub> , mise en évidence de la zone faillée ...	92
Fig. 44b	Oizy, mise en évidence de la zone faillée .....	92
Fig. 45a	Oizy, mise en parallèle des profils P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> : situation des profils .....	93
Fig. 45b	Oizy : schéma panoramique du pré du Renard, implantation des profils, passage probable des failles F <sub>1</sub> et F <sub>2</sub> .....	94
Fig. 46	Utilisation des mesures en spectrométrie gamma des boukoals dans la mise en évidence de la décroissance vers l'Est de la carrière d'Oizy, des émanations de Radon .....	95
Fig. 47	Hydrochimie : mise en évidence du "dôme" Radon d'Oizy par les analyses d'eau de source .....	96
Fig. 48	Utilisation des profils boukoals dans l'interprétation tectonique .....	97
Fig. 49	Cartographie du "dôme" Radon d'Oizy ( <i>un QUINIF et al, 1984</i> )	97
Fig. 50	Site de Monceau : implantation des profils émanométriques P <sub>1</sub> et P <sub>2</sub> : bloc diagramme montrant l'augmentation des teneurs mesurées lorsque l'on se dirige vers l'Est .....	99
Fig. 51	Monceau : profil P <sub>3</sub> .....	100
Fig. 52	Monceau : profil P <sub>4</sub> .....	101

### CHAPITRE III

Fig. 53	Evolution des coefficients de partage S <sub>1</sub> (Rn - H <sub>2</sub> O) et S <sub>2</sub> (Rn-Toluène) et du rapport R = S <sub>2</sub> /S <sub>1</sub> en fonction de la température .....	106
Fig. 54	Influence de la température d'extraction sur l'activité ..	107
Fig. 55	Fluctuation des taux de compage, cas des prélèvements en série .....	108

Fig. 56	Influence de la durée de mise en présence des 2 phases liquides sur les taux de comptage .....	109
Fig. 57	Relation It-I610 pour 201 dosages de Radon extrait par le Toluène .....	110
Fig. 58	Oizy : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources et fontaines .....	111
Fig. 59	Monceau : evolution dans le temps des concentrations en Radon de 7 sources .....	113
Fig. 60	Six-Planes : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources .....	114
Fig. 61	Le Rouvelet-Les Maisonnettes : évolution dans le temps des concentrations en Radon de 6 sources .....	115
Fig. 62	Situation des stations météorologiques et des principales anomalies en Radon (d'après la carte Michelin n° 4 de Belgique) .....	116
Fig. 63	Comparaison entre les variations de la température et les variations des concentrations en Radon (S 20) A : Libramont; B : Charleville-Mezières .....	117
Fig. 64	Comparaison entre l'évolution de la pression atmosphérique et celle des concentrations en Radon (S 20) .....	118
Fig. 65	Comparaison entre l'évolution de la Pluviométrie, celle des concentrations en Radon (S 20) A : Libramont; B : Charleville-Mezières .....	119
Fig. 66	A : représentation dans le plan $F_1, F_2$ des variables prises en compte dans l'AM B : Position des échantillons dans le plan $F_1-F_2$ .....	123
Fig. 67	Poids des variables selon $F_1, F_2, F_3$ dans l'AM des 190 échantillons d'eau analysés .....	124
Fig. 68	Oizy, S 8 : A. Position des variables dans le plan $F_1-F_2$ B. Position des individus dans le plan $F_1-F_2$ ...	126
Fig. 69	Oizy, S 8 : poids des facteurs .....	126
Fig. 70	Monceau, S 19 : poids des facteurs .....	127
Fig. 71	Monceau, S 19 : A. position des variables dans le plan $F_1-F_2$ B. position des individus dans le plan $F_1-F_2$	127
Fig. 72	Le Rouvelet-Les Maisonnettes, S 6 A : position des variables dans le plan $F_1-F_2$ B : position des individus dans le plan $F_1-F_2$ .....	128
Fig. 73	Six-Plances, S 4 A: position des variables dans le plan $F_1-F_2$ B: position des individus dans le plan $F_1-F_2$ .....	128
Fig. 74	Le Rouvelet-Les Maisonnettes, S 6 poids des facteurs .....	129
Fig. 75	Six-Planes, S 4 : poids des facteurs .....	129
Fig. 76	Situation des sources et fontaines analysées par le Ministère de la Santé Publique .....	131
Fig. 77	Comparaison des résultats des 3 types de dosage du Radon 222	132
Fig. 78	Principaux résultats des analyses du Ministère de la Santé Publique. Comparaison avec les résultats de la F.P.Ms .....	133

Fig. 79	Relation Rn (F.P.Ms) = f (Radium) .....	134
Fig. 80	Relation Rn (F.P.Ms) = f (Rn1). Comparaison entre l'activité du toluène et le dosage par estimation des produits de filiation .....	135
Fig. 81	Relation Rn (F.P.Ms) = f (Rn2). Comparaison entre l'activité du toluène et le dosage par émanation .....	135
Fig. 82	Conversion des Activités (Y en cp/mn/l) en doses (X en pCi/l) .....	136
Fig. 83	Radon libre et Radon lié. Résultats de 2 extractions sur 3 exemples ( <i>in</i> QUINIF <i>et al</i> , 1984) .....	137
Fig. 84	Relation Rn (F.P.Ms) = f (Ra) (R = 0,180) .....	138
Fig. 85	2ème extraction, relation Rn (F.P.Ms) = f (Ra) (R=0,810) .....	138

## TROISIEME PARTIE

### CHAPITRE I

Fig. 86	Carrière d'Oizy. Vue d'ensemble .....	145
Fig. 87	Colonne lithostratigraphique synthétique, activité de terrain .....	146
Fig. 88	Grès à stratifications entrecroisées .....	147
Fig. 89	Quartzophyllades .....	147
Fig. 90	Structure de la carrière d'Oizy A : coupe synthétique B : schéma panoramique .....	149
Fig. 91	Mise en évidence des directions de fracturation D1 et D2 dans la carrière d'Oizy .....	148
Fig. 92	Carrière d'Oizy. Situation de 12 fractures dont le remplissage est anormal .....	150
Fig. 93	Fractures anormales .....	151
Fig. 94	Route Oizy-Baillamont. Colonne lithostratigraphique. Activité de terrain .....	156
Fig. 95	R.O.B. Situation des pointements anomaux .....	157
Fig. 96	R.O.B. Mise en évidence des directions de fracturation D 1 et D 2 .....	157
Fig. 97	Situation du pointement anormal de Chertiri-Orchimont ...	158

### CHAPITRE II

Fig. 98	Situation des échantillons ayant servis à établir le bruit de fond .....	166
Fig. 99	Analyse en spectrométrie gamma des échantillons bruit de fond : tableau des résultats .....	167
Fig.100	Analyse en spéctrométrie gamma des remplissages de fractures - Résultats : A. Carrière d'Oizy; B. Autres situations..	168
Fig. 101	Oizy : présentation graphique des résultats de l'analyse en spectrométrie gamma .....	169

Fig. 102	Carrière d'Oizy, résultats de l'analyse en spectrométrie gamma des roches .....	172
Fig. 103	Oizy : comparaison entre la radioactivité de terrain et la teneur en Um .....	170
Fig. 104	R.O.B. : fracture dégagée dans le talus de la route (R.O.B. 35) .....	171
Fig. 105	Route Oizy-Baillamont : comparaison entre l'activité de terrain et la teneur en Uranium métal .....	173
Fig. 106	Route Oizy-Baillamont : résultats de l'analyse en spectrométrie gamma des roches .....	172
Fig. 107	Carte des concentrations en Uranium dans les sédiments de surface .....	174
Fig. 108	Analyse en spectrométrie gamma. Tableau des résultats des analyses d'alluvions (P.A.L.) .....	176
Fig. 109	Situation géographique des P.A.L. analysés en spectrométrie gamma - Position des principales anomalies Radon ...	175
Fig. 110	La famille de l'Uranium 238; Z = nombre atomique N = nombre de masse .....	177
Fig. 111	Relation Um-Ur pour l'ensemble des échantillons (P.A.F. & P.A.O. ) .....	180
Fig. 112	Relation Um-Ur pour les P.A.O. seuls .....	180
Fig. 113	Monceau. Spectrométrie gamma <i>in situ</i> : implantation des sondages, situation géographique et géologique .....	182
Fig. 114	Monceau : spectrométrie gamma <i>in situ</i> . Résultats des mesures .....	183
Fig. 115	Evolution des teneurs en radioéléments selon deux verticales .....	184
Fig. 116	Evolution des teneurs en radioéléments selon la ligne T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> .....	185
Fig. 117	Analyse en spectrométrie gamma de laboratoire des échantillons prélevés à la tarière .....	186

### CHAPITRE III

Fig. 118	Spectrométrie alpha P.A.O.024: A. spectre de l'Uranium B. spectre du Thorium ....	192
Fig. 119	Spectrométrie alpha, P.A.F.026:A. spectre de l'Uranium B. spectre du Thorium ....	193
Fig. 120	Résultats des analyses en spectrométries alpha et gamma (échantillons P.A.O. 024 et P.A.F. 026) .....	194

### CHAPITRE IV

Fig. 121	Proportions de M.O.D. présente dans les échantillons ayant subi une séparation en flottation .....	204
Fig. 122	Relation Um-MOD mise en évidence des 2 familles d'échantillons .....	205

Fig. 123	Relation Um-M.O.D. pour chacune des 2 familles d'échantillons .....	206
Fig. 124	Analyse en diffractométrie des rayons "X". Tableau des résultats .....	207
Fig. 125	Exemples de diffractogrammes pour les 3 faciès étudiés .	208
Fig. 126	Carrière d'Oizy : évolution de la composition argileuse de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m .....	209
Fig. 127	Relation Um-Illite. A. ensemble des échantillons B. mise en évidence de 2 familles ..	210
Fig. 128	Relation Um-Illite. I pour la famille I II pour la famille II .....	210
Fig. 129	Granulométrie des remplissages : histogrammes de répartition des classes granulométriques .....	211
Fig. 130	Allure des courbes de fréquence tracées à partir des histogrammes de la figure 129 .....	212
Fig. 131	Analyse granulométrique .....	213
Fig. 132	Exemple de diffractogramme de la fraction argileuse d'un remplissage de fracture .....	220
Fig. 133	Proportions relatives en minéraux argileux .....	220
Fig. 134	Proportions relatives en hydroxydes de fer et leur état de cristallinité .....	221
Fig. 135	Oizy : exemple de morphologie des fonds continus en diffraction des rayons "X" .....	222
Fig. 136	Variations des concentrations en Uranium et des proportions en minéraux argileux de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m des remplissages de fractures .....	223
Fig. 137	Relation Um-Illite pour les échantillons P.A.F. de la carrière d'Oizy .....	224
Fig. 139	Relation Um-Cté de la Lépido-cro-cite; distinction des familles I et II mise en évidence à partir de l'Illite .	225

## CHAPITRE V

Fig.140	Evolution de la radioactivité en fonction de la granulométrie .....	233
Fig.141	Evolution de la radioactivité en fonction de la granulométrie et de la situation au sein de la fracture .....	234
Fig.142	Tableau des résultats des analyses en anticoincidence (autres que couplées à la granulométrie)	235
Fig.143	Détermination de la décroissance de la radioactivité au sein de la roche par le comptage du nombre d'impacts A. au compteur de points par tranches de 0.5 mm B. à partir de photographies à raison de 2 clichés par tranche de 0.5 mm .....	240

Fig. 144	Etude en anticoincidence; préparation des échantillons	241
Fig. 145	Anticoincidence. Evolution de la radioactivité à partir de l'éponte au sein de la roche .....	242
Fig. 146	Tableau de résultats des analyses en anticoincidence sur les épontes de fracture .....	243
Fig. 147	Résultats des analyses en anticoincidence de quelques échantillons de M.O.D. ....	244

## CHAPITRE VI

Fig. 148	Dosage du fer total : résultats des analyses de remplissages de fractures. Légende dans le texte .....	250
Fig. 149	Comparaison des teneurs en radioéléments et de la teneur en Fer des remplissages de fracture du groupe A .....	251
Fig. 150	Résultats des dosages du Fer total (34 échantillons de la carrière, 20 échantillons de la R.O.B.) .....	252
Fig. 151	Evolution des teneurs en fer dans les coupes de la carrière (A) et de la R.O.B. (B) .....	252
Fig. 152	Teneurs en Fer et en Uranium des échantillons de la carrière d'Oizy. Distinction des faciès .....	254
Fig. 153	Evolution de la teneur en fer au sein des épontes de fractures .....	255
Fig. 154	Comparaison entre les résultats de l'anticoincidence et le dosage du fer (P.A.F.025) .....	255
Fig. 156	Relation Fer-Uranium : a. pour l'ensemble des échantillons b. pour les remplissages de fractures de la carrière d'Oizy .....	257
Fig. 157	Diverses courbes porteuses en diagrammes Th/U - U/K <sub>2</sub> O ..	259
Fig. 158	Valeurs des coefficients a,b,c et d des courbes porteuses de la figure 157 .....	260
Fig. 159	Allure des courbes porteuses dans le diagramme Th/U-Th/K <sub>2</sub> O. I, II, IIIa et IIIb constituent les types explicités dans le texte .....	261
Fig. 161	Diagramme Th-K <sub>2</sub> O des échantillons d'alluvions .....	262
Fig. 162	Diagramme Th-K <sub>2</sub> O des échantillons d'alluvions .....	262
Fig. 163	Valeur des coefficients a, b,c,d et coefficients de corrélation des courbes porteuses des échantillons analysés en diagramme Th - U - K .....	263
Fig. 164	Diagramme Th+Um - Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de remplissages de fractures .....	264
Fig. 165	Diagramme ln Th/Um - ln UM/K <sub>2</sub> O des échantillons de remplissages de fractures .....	264
Fig. 166	Diagramme Th - K <sub>2</sub> O des échantillons de remplissages de fractures .....	265
Fig. 167	Diagramme Th/K <sub>2</sub> O - Th/Um, mise en évidence de l'appartenance des P.A.F. au faciès II .....	265

Fig. 168	Diagramme Th/Um-Um/K <sub>2</sub> O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur .....	267
Fig. 169	Diagramme 1n Th/Um - 1n UM/K <sub>2</sub> O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur .....	267
Fig. 170	Diagramme Th-K <sub>2</sub> O de l'ensemble des échantillons du Gédinnien inférieur .....	267
Fig. 171	Diagramme Th/Um - Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de Grès .....	269
Fig. 172	Diagramme 1n Th/Um - 1n Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de Grès .....	270
Fig. 173	Diagramme Th/Um-Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de quartzophyllades .....	270
Fig. 174	Diagramme 1n Th/Um - 1n Um/K <sub>2</sub> O (quartzophyllades) .....	271
Fig. 175	Diagramme Th/U - Th/K <sub>2</sub> O des échantillons de quartzophyllades .....	271
Fig. 176	Diagramme Th/Um - Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de phyllades .....	271
Fig. 177	Diagramme 1n Th/Um - 1n Um/K <sub>2</sub> O des échantillons de phyllades .....	272
Fig. 178	Diagramme Th/U - Th/K <sub>2</sub> O des échantillons de phyllades ..	272
Fig. 179	Diagramme Th/Um - Um/K <sub>2</sub> O des échantillons d'épontes .....	273
Fig. 180	Diagramme 1n Th/Um - 1n Um/K <sub>2</sub> O des échantillons d'épontes .....	273
Fig. 181	Diagramme Th - K <sub>2</sub> O des échantillons d'épontes .....	273

## CHAPITRE VII

Fig. 182	A.M. des alluvions : poids des facteurs .....	278
Fig. 183	A.M. des alluvions représentation du plan F1 - F2 a : position des variables; b : position des individus ..	278
Fig. 184	A.M. I des remplissages de fractures : poids des facteurs .....	279
Fig. 185	A.M. des remplissages A. position des variables dans le plan F1 - F2 B. position des individus .....	279
Fig. 186	A.M. II des remplissages de fractures: poids des facteurs .....	281
Fig. 187	A.M. II des remplissages : A. position des variables dans le plan F1 - F2 B. position des individus .....	281
Fig. 188	A.M. III des remplissages de fractures : poids des facteurs .....	282
Fig. 189	A.M. III des remplissages A. position des variables dans le plan F1 - F2 B. position des individus .....	282
Fig. 190	A.M. I des roches : A. position des variables dans le plan F1 - F2 B. position des individus .....	283
Fig. 191	A.M. II, M.O.D. (1) A. position des variables dans le plan F1 - F2 B. position des individus .....	285



Fig. 192	A.M. II, M.O.D. (2) :	
	A. position des variables dans le plan F1 - F2	
	B. position des individus .....	286
Fig. 193	A.M. III, ILLITE (1)	
	A. position des variables dans le plan F1 - F2	
	B. position des individus .....	287
Fig. 194	A.M. III, ILLITE (2)	
	A. position des variables dans le plan F1 - F2	
	B. position des individus .....	287
Fig. 195	A.M. IV, % FER	
	A. position des variables dans le plan F1 - F2	
	B. position des individus .....	288
Fig. 196	A.M. V des roches (toutes variables)	
	A. position des variables dans le plan F1 - F2	
	B. position des individus .....	289

#### QUATRIEME PARTIE

Fig. 197	Modélisation du mode de concentration et remobilisation de l'Uranium dans un site de type-Oizy .....	296
----------	---	-----

TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT PROPOS .....	1
ABSTRACT .....	5
IÈRE PARTIE .....	7
CHAPITRE I.- INTRODUCTION .....	9
1.1. GENERALITES .....	11
1.2. PRESENTATION DU SUJET .....	11
CHAPITRE II.- COMPORTEMENTS DE L'URANIUM ET DU RADON ..	15
2.1. L'URANIUM .....	17
2.1.1. SOURCES ET PARCOURS DE L'URANIUM .....	17
2.1.2. COMPORTEMENT CHIMIQUE DE L'URANIUM .....	20
2.1.2.1. L'ion uraneux $U^{4+}$ .....	20
2.1.2.2. L'ion hexavalent $U^{6+}$ .....	21
2.1.2.3. Complexation de $UO_2^{2+}$ .....	22
2.1.3. LES LIAISONS POSSIBLES DE L'URANIUM AVEC DU MATERIEL SEDIMENTAIRE .....	23
2.1.4. L'URANIUM ET LA MATIERE ORGANIQUE .....	24
2.1.5. L'URANIUM ET LES OXYHYDROXYDES DE FER .....	25
2.1.6. GISEMENTS URANIFERES ASSOCIES A DES ALTERATIONS SUPERGENES .....	27
2.2. LE RADON .....	29
2.2.1. GENERALITES .....	29
2.2.2. MIGRATION DU RADON .....	30
2.2.2.1. Le pouvoir émanateur .....	31
2.2.2.2. Diffusion et transport .....	32
2.2.3. LES MODES DE DETECTION DU RADON .....	34
2.2.3.1. Introduction .....	34
2.2.3.2. Détection du Radon dans les sols .....	35
2.2.3.3. Détection du Radon dans les eaux naturelles .....	36
2.2.3.4. Le choix des méthodes .....	37
2.2.4. INFLUENCES CLIMATOLOGIQUES .....	37

CHAPITRE III.- PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE .....	39
3.1. LOCALISATION ET CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	41
3.1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE .....	41
3.1.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	43
3.1.2.1. Le cadre général : l'Ardenne .....	43
3.1.2.2. Généralités sur l'Eodévonien de l'Ardenne .....	43
3.2. LES DONNEES GEOLOGIQUES DU DOMAINE D'ETUDE ...	44
3.2.1. STRATIGRAPHIE DU GEDINNIEN .....	44
3.2.1.1. Introduction .....	44
3.2.1.2. Stratigraphie du Gédinnien inférieur .....	44
3.2.1.3. Stratigraphie du Gédinnien supérieur (G <sub>2</sub> ) .....	47
3.2.2. LES GRANDS TRAITs STRUCTURAUX DU DOMAINE D'ETUDE ....	49
3.2.2.1. Généralités .....	49
3.2.2.2. Les plis sur le terrain .....	51
a) la partie occidentale .....	51
b) la partie orientale .....	53
3.2.2.3. Les failles - la fracturation .....	54
a) la partie occidentale .....	55
b) le secteur oriental .....	56
3.2.2.4. Conclusion .....	57
3.2.3. EVOLUTION POST-PALEOZOIQUE. GENERALITES .....	57
3.2.3.1. Les dernières transgressions et l'installation du réseau hydrographique .....	57
3.2.3.2. Les surfaces de transgression et les surfaces d'aplanissement .....	58
IIÈME PARTIE .....	61
CHAPITRE I.- PROSPECTIONS RADIOMETRIQUE ET PEDESTRE ..	63
1.1. PROSPECTION RADIOMETRIQUE AUTOPORTEE .....	65
1.1.1. L'ANTICLINAL DE L'ARDENNE .....	65
1.1.2. L'ANOMALIE DE LA CARRIERE D'OIZY .....	67
1.2. PROSPECTION RADIOMETRIQUE PEDESTRE .....	69
1.2.1. RESULTATS DE LA PROSPECTION DE LA PARTIE OCCIDENTALE .	69
1.2.2. RESULTATS DE LA PROSPECTION DE LA PARTIE ORIENTALE ...	69
1.2.3. CONCLUSIONS . .....	70

CHAPITRE II.- PROSPECTION DES ANOMALIES CACHEES .....	71
2.1. INTRODUCTION : LE CHOIX DE L'OUTIL .....	73
2.2. PROSPECTION STRATEGIQUE : PROSPECTION HYDROLOGIQUE	73
2.2.1. INTRODUCTION .....	73
2.2.2. DESCRIPTION DE LA METHODE .....	74
2.2.2.1. Introduction .....	74
2.2.2.2. Principe de la méthode .....	74
a) Comportement du Radon dans les fluides .....	74
b) mode opératoire .....	76
2.2.3. APPLICATION AU TERRAIN D'ETUDE .....	77
2.2.3.1. Prospection du secteur oriental .....	81
a) Anomalie d'Oizy .....	81
b) Anomalie de Monceau .....	81
c) Anomalie du Rouvelet-Les Maisonnettes .....	83
d) Anomalie de Six Planes .....	85
2.2.3.2. Prospection du secteur occidental .....	87
2.2.4. CONCLUSIONS .....	87
2.3. PROSPECTION TACTIQUE .....	89
2.3.1. TECHNIQUES D'ETUDE .....	89
2.3.1.1. Emanométrie .....	89
2.3.1.2. Les détecteurs au charbon actif .....	89
2.3.2. APPLICATION A L'ANOMALIE D'OIZY .....	90
2.3.2.1. Introduction; données de la géophysique .....	91
2.3.2.2. Les profils boukoals .....	91
2.3.3. APPLICATION A L'ANOMALIE DE MONCEAU.....	98
2.3.3.1. L'émanométrie .....	98
2.3.3.2. Conclusion .....	101

CHAPITRE III.- INTERPRETATION DES RESULTATS DE LA PROSPECTION HYDROLOGIQUE .....	103
3.1. INTRODUCTION .....	105
3.2. LES FACTEURS DE VARIATION LIES A LA METHODE UTILISEE	105
3.2.1. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE .....	105
3.2.1.1. Données bibliographiques .....	105
3.2.1.2. Données expérimentales .....	106

	pages
3.2.2. CAS DES PRELEVEMENTS EN SERIE .....	108
3.2.3. INFLUENCE DE LA DUREE DE MISE EN PRESENCE DES 2 PHASES LIQUIDES .....	109
3.3. HYDROCHIMIE ET CLIMATOLOGIE .....	111
3.3.1. INTRODUCTION .....	111
3.3.2. LES FAITS D'OBSERVATION .....	111
3.3.3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES .....	116
3.3.3.1. Introduction .....	116
3.3.3.2. La température .....	118
3.3.3.3. La Pression atmosphérique .....	118
3.3.3.4. La pluviométrie .....	120
3.3.3.5. Conclusion .....	120
3.3.4. TRAITEMENR DES DONNEES PAR ANALYSE MULTIVARIABLE (A.M.) ....	120
3.3.4.1. Introduction .....	120
3.3.4.2. Généralités sur l'A.M. ....	121
3.3.4.3. Application .....	121
a) Analyse multivariabile des 190 échantillons .....	121
b) A.M. du comportement de quelques sources .....	125
3.3.5. CONCLUSION .....	130
3.4. ANALYSE QUANTITATIVE DE QUELQUES SOURCES .....	131
3.4.1. INTRODUCTION .....	131
3.4.2. LES RESULTATS .....	132
3.4.2.1. Présentation des résultats du Ministère de la Santé Publique .....	132
3.4.2.2. Comparaison entre les données de la F.P. Ms et celles du Ministère de la Santé Publique .....	132
3.5. LE RADIUM DANS LES EAUX ANALYSEES .....	136
3.5.1. INTRODUCTION .....	136
3.5.2. DETERMINATION DE LA PRESENCE DE RADON "LIE" .....	137
3.5.3. RADON ET RADIUM, UTILISATION DES DONNEES DU MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE .....	137
3.5.4. CONCLUSION .....	139

	pages
3.6. ASPECTS HYDROLOGIQUES .....	139
3.6.1. GENERALITES .....	139
3.6.2. POSSIBILITES D'ETUDES FUTURES .....	140
3.7. CONCLUSIONS PERSPECTIVES D'ETUDES .....	140
IIIÈME PARTIE .....	141
CHAPITRE I.- PRESENTATION TECTONO-STRATIGRAPHIQUE DES ANOMALIES .....	143
1.1. L'ANOMALIE DE LA CARRIERE D'OIZY .....	145
1.1.1. LITHOSTRATIGRAPHIE .....	145
1.1.2. STRUCTURE DE LA CARRIERE D'OIZY .....	148
1.1.3. LOCALISATION DE L'ANOMALIE .....	150
1.2. L'ANOMALIE DE LA ROUTE OIZY-BAILLAMONT (R.O.B.) ..	156
1.2.1. LITHOSTRATIGRAPHIE .....	156
1.2.2. STRUCTURE .....	157
1.2.3. LOCALISATION DE L'ANOMALIE .....	158
1.3. INDICE DE CHERTIRI .....	159
1.4. CONCLUSION .....	159
CHAPITRE II.- ETUDES EN SPECTROMETRIE GAMMA .....	161
2.1. SPECTROMETRIE GAMMA DE LABORATOIRE .....	163
2.1.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS .....	163
2.1.2. PRESENTATION DE LA METHODE .....	164
2.1.3. RESULTATS DES ANALYSES. INTERPRETATIONS .....	165
2.1.3.1. Etudes préliminaires, le bruit de fond régional .....	165
2.1.3.2. Analyse des remplissages de fractures .....	167
2.1.3.3. Analyses des roches .....	169
2.1.3.3.1. Carrière d'Oizy .....	169
2.1.3.3.2. La route Oizy-Baillamont (R.O.B.) .....	171
2.1.3.4. Analyse des alluvions .....	174
2.1.3.5. Etude du déséquilibre radioactif .....	177
2.1.3.6. Radioactivité totale (Ur) et concentration en Um .....	179

	pages
2.2. SPECTROMETRIE GAMMA IN SITU .....	181
2.2.1. INTRODUCTION .....	181
2.2.2. PRINCIPE DE LA SPECTROMETRIE GAMMA IN SITU .....	181
2.2.3. RESULTATS. INTERPRETATION .....	183
2.2.3.1. Implantation des sondages .....	183
2.2.3.2. Résultats. Interprétation .....	183
2.2.4. ANALYSES EN SPECTROMETRIE GAMMA DE LABORATOIRE .....	185
2.2.5. CONCLUSIONS .....	186
CHAPITRE III.- SPECTROMETRIE ALPHA .....	187
3.1. INTRODUCTION .....	189
3.2. GENERALITE SUR LA METHODE .....	189
3.2.1. INTRODUCTION .....	189
3.2.2. PROCEDURE CHIMIQUE DE PREPARATION DES ECHANTILLON .....	190
3.2.3. SPECTROMETRIE ALPHA .....	191
3.2.4. DETERMINATION DE L'ACTIVITE .....	191
3.3. LES RESULTATS .....	191
3.3.1. INTRODUCTION .....	191
3.3.2. ANALYSE DE P.A.O. 024 .....	191
3.3.3. ANALYSE DE P.A.F. 026 .....	194
3.3.4. CONCLUSION .....	195
CHAPITRE IV.- ETUDES PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES .....	199
4.1. LES PHYLLADES DE LEVREZY ET LES QUARTZOPHYLLADES DE BRAUX .....	199
4.1.1. ETUDES AU MICROSCOPE POLARISANT .....	199
4.1.1.1. Les phyllades .....	199
4.1.1.2. Les quartzophyllades .....	199
4.1.1.3. Les grès .....	202
4.1.2. ETUDES DE LA MATIERE ORGANIQUE DISPERSEE (M.O.D.) .....	202
4.1.2.1. Introduction .....	202
4.1.2.2. Résultats .....	202
a) Mesures optiques .....	202
b) la séparation de la M.O.D. par flottation .....	203
4.1.2.3. Relation M.O.D.-Uranium métal .....	203

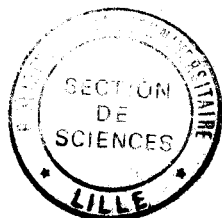


4.1.3. ETUDE EN DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X .....	206
4.1.3.1. Introduction .....	206
4.1.3.2. Les résultats .....	206
4.1.3.3. Les relations argiles-radioéléments .....	208
4.2. LES REMPLISSAGES LIMONITIQUES DE FRACTURES .....	209
4.2.1. GRANULOMETRIE .....	209
4.2.2. ETUDES OPTIQUES .....	213
4.2.2.1. Détermination optique de la composition minérale .....	213
4.2.3. ETUDES EN DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X .....	218
4.2.3.1. Introduction .....	218
4.2.3.2. Composition minéralogique .....	219
4.2.3.3. Etude de la fraction argileuse .....	219
a) Les minéraux argileux .....	220
b) les minéraux du fer .....	221
4.2.3.4. Relations entre les données de la diffractométrie des rayons X et les teneurs en Uranium .....	222
a) Relations minéraux argileux-Uranium .....	222
b) Relations Hydroxydes de fer-Uranium .....	223
4.3. ORIENTATION A DONNER AU TRAVAIL .....	225
CHAPITRE V.- ETUDE EN AUTORADIOGRAPHIE ET EN ANTICOINCIDENCE .....	227
5.1. INTRODUCTION .....	229
5.2. ETUDE DES REMPLISSAGES DE FRACTURES .....	229
5.2.1. ETUDES EN AUTORADIOGRAPHIE .....	229
5.2.2. ETUDES EN ANTICOINCIDENCE .....	232
5.2.2.1. ETUDES COUPLEES A LA GRANULOMETRIE .....	232
5.2.2.2. AUTRES ETUDES .....	234
5.2.3. CONCLUSION .....	236
5.3. ETUDE DES ROCHES .....	237
5.3.1. ETUDE EN AUTORADIOGRAPHIE .....	237
5.3.1.1. LES ROCHES LES PLUS ACTIVES .....	237
5.3.1.2. ETUDES DES EPONTES .....	237

5.3.2. ETUDES EN ANTICOINCIDENCE .....	241
5.3.2.1. Etude des épontes de fractures .....	241
5.3.2.2. Etude de la M.O.D. ....	244
5.3.2.3. Conclusions .....	244
5.4. CONCLUSION - ORIENTATION A DONNER AU TRAVAIL .....	245
CHAPITRE VI.- ETUDES GEOCHIMIQUES .....	247
6.1. LE DOSAGE DU FER TOTAL .....	249
6.1.1. INTRODUCTION .....	249
6.1.2. LES RESULTATS .....	249
6.1.2.1. Le titre en fer des remplissages de fractures .....	249
6.1.2.2. La teneur en fer des roches .....	251
6.1.2.3. L'étude du fer dans les épontes .....	256
6.1.3. CONCLUSION RELATIONS FER - URANIUM .....	256
6.2. ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES RADIOELEMENTS EN DIAGRAMME T-U-K. ....	258
6.2.1 INTRODUCTION .....	258
6.2.2. PRESENTATION DU PRINCIPE DE L'ANALYSE DES FACIES PAR LES DIAGRAMME T-U-K .....	258
6.2.2.1. Les diagrammes Th/U - U/K <sub>2</sub> O .....	259
6.2.2.2. Diagramme Th - K <sub>2</sub> O .....	260
6.2.3. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX ALLUVIONS (SEDIMENTS DE COUVERTURE) (P.A.L.) .....	261
6.2.4. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX REMPLISSAGES DE FRACTURES .....	263
6.2.4.1. Le diagramme U/K <sub>2</sub> O - Th/U .....	263
6.2.4.2. Le diagramme Th - K <sub>2</sub> O .....	265
6.2.4.3. Le diagramme Th/K <sub>2</sub> O - Th/U .....	266
6.2.5. APPLICATION DE L'ANALYSE EN DIAGRAMME T-U-K AUX SEDIMENTS DU GEDINNIEN INFERIEUR .....	266
6.2.5.1. Introduction .....	266
6.2.5.2. Analyse de l'ensemble des échantillons .....	266
6.2.5.3. Remarques sur les différences et similitudes mises en évidence par l'étude des faciès .....	268
6.2.5.4. Points particuliers à l'étude des grès .....	269
6.2.5.5. Points particuliers à l'analyse des quartzophyllades ...	270
6.2.5.6. Points particuliers à l'analyse de phyllades .....	271
6.2.5.7. Points particuliers à l'analyse des épontes .....	272
6.2.5.8. Conclusions .....	274

CHAPITRE VII TRAITEMENT DE L'ENSEMBLE DES DONNEES EN ANALYSE MULTIVARIABLES ...	275
7.1 INTRODUCTION - GENERALITES .....	277
7.2 ANALYSE MULTIVARIABLE DES ALLUVIONS .....	277
7.2.1. LES VARIABLES .....	277
7.2.2. L'A.M. ....	277
7.2.2.1. La position des variables .....	277
7.2.2.2. La position des individus .....	278
7.3. ANALYSE MULTIVARIABLE DES REMPLISSAGES DE FRACTURE .....	279
7.3.1. INTRODUCTION .....	279
7.3.2. TRAITEMENT I : LES VARIABLES RADIOMETRIQUES .....	279
7.3.3. TRAITEMENT II : VARIABLES RADIOMETRIQUES, VARIABLES LIEES AU FER ...	280
7.3.4. TRAITEMENT III : VARIABLES RADIOMETRIQUES, GEOCHIMIQUES, MINERALOGIQUES	281
7.3.5. CONCLUSION .....	282
7.4. A.M. DES ROCHES .....	283
7.4.1. TRAITEMENT I : DONNEES RADIOMETRIQUES .....	283
7.4.2. TRAITEMENT II : VARIABLES RADIOMETRIQUES ET M.O.D. ....	284
7.4.2.1. Introduction .....	284
7.4.2.2. Traitement II - M.O.D.(1) : famille I .....	284
7.4.2.3. Traitement II - M.O.D.(2) : famille II.....	285
7.4.3. TRAITEMENT III : DONNEES RADIOMETRIQUES, POURCENTAGE D'ILLITE .....	286
7.4.3.1. Introduction .....	286
7.4.3.2. Traitement III Illite (1) : famille I .....	286
7.4.3.3. Traitement III Illite (2) : famille II .....	287
7.4.4. TRAITEMENT IV : VARIABLES RADIOMETRIQUES, TENEUR EN FER .....	288
7.4.5. TRAITEMENT V : VARIABLES RADIOMETRIQUES, ILLITE, FER M.O.D. ....	289
VIÈME PARTIE .....	291
CONCLUSION GENERALES .....	293
I. PRINCIPAUX RESULTATS .....	293
I.1 RADON .....	293
I.2. L'ANOMALIE EN URANIUM OIZY - R.O.B. ....	293
II MODELISATION DU TYPE DE CONCENTRATION ET DE REMOBILISATION DE L'URANIUM DANS LE CONTEXTE D'OIZY .....	295
III PROBLEMES ET PERSPECTIVES .....	298

<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	303
TABLE DES FIGURES .....	311
TABLE DES MATIÈRES .....	321
ANNEXES .....	331
A-I APPAREILLAGE DE PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE PEDESTRE .....	333
A-II CONVERSION DE LA RADIOACTIVITE TOTALE "TC" EN UNITE DE RADIOACTIVITE (Ur) .....	335
A-III PROSPECTION HYDROLOGIQUE .....	336
A-IV LA SPECTROMETRIE GAMMA .....	342
A-V ANALYSE EN AUTORADIOGRAPHIE .....	347
A-VI L'ANALYSE EN ANTICOINCIDENCE .....	349
A-VII DOSAGE DU FER TOTAL .....	351
A-VIII ANALYSES DU MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE .....	352
RESUME .....	4ème page de couverture



**ANNEXES**





## ANNEXE 1

### APPAREILLAGE DE PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE PEDESTRE

#### 1 DESCRIPTION

Le scintillateur portable employé sur le terrain est un Geometrics GR 101 A (fig. 1).

Cet appareil allie plusieurs qualités indispensables à tout matériel de prospection :

- la légèreté
- la résistance aux chocs et à l'humidité
- la fiabilité

Son principe de fonctionnement est identique à celui de tout scintillateur de laboratoire, de terrain. Il est schématisé en figure 1, tirée de la thèse de 3ème Cycle de L. DORCHIES (1984).

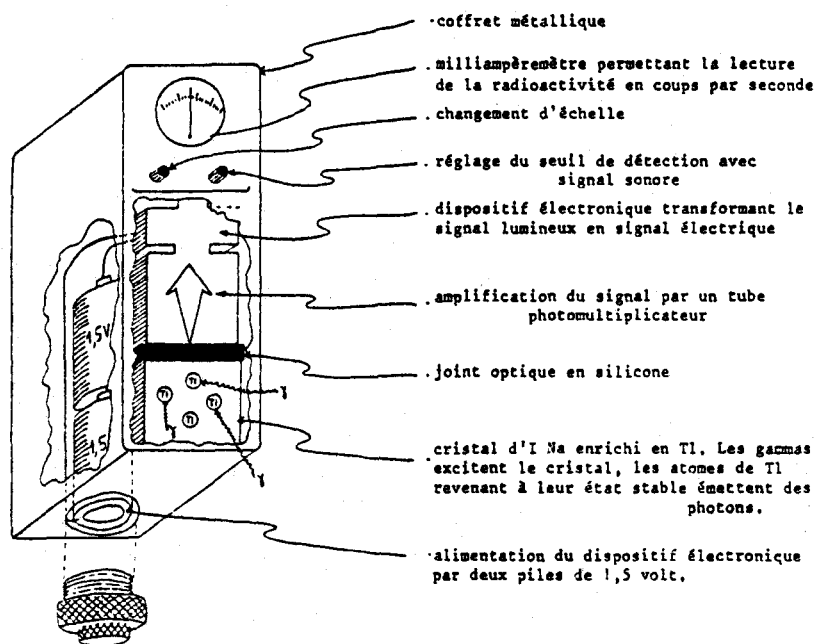


Fig.1 : Schéma du scintillomètre portable  
employé de type Géométrics Modèle GR-101 A .

in L. DORCHIES (1984)



## 2 CALIBRAGE

Pour calibrer ses instruments de mesure, la Faculté Polytechnique de Mons dispose d'une station de calibrage. Elle est constituée de 4 dalles de béton de 2 m de diamètre et de 0,65 m d'épaisseur. Trois d'entre elles sont dopées comme suit :

- 36 ppm d'U pour la première,
  - 102 ppm de Th pour la seconde,
  - 8,19 % de  $K_2O$  pour la troisième,
  - la quatrième, en béton, sert de référence au bruit de fond (fig. 2)
- (CHARLET, DRUMEL, QUINIF et YANS, 1982).

Régulièrement, le scintillateur employé sur le terrain a été calibré sur cette station. Je présente en figure 2 le résultat de certains de ces calibrages.

FIGURE 2

DATES	CALIBRAGE DU GEOMETRICS GR 101 A <i>(en coups par seconde)</i>			
	Dalle béton	Dalle U	Dalle Th	Dalle K
23-11-82	20	125	180	55
20-01-83	20	150	225	65
05-07-83	16	110	170	52
20-09-83	18	125	205	60
20-06-84	20	110	190	58



## ANNEXE II

### CONVERSION DE LA RADIOACTIVITE TOTALE "TC" EN UNITES DE RADIOACTIVITE (U<sub>r</sub>)

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (I.A.E.A.) recommande l'adoption de l'unité de radioactivité U<sub>r</sub> pour standardiser les résultats de comptage global au "total count".

Un U<sub>r</sub> correspondant au taux de comptage qu'on obtiendrait sur une formation homogène qui contiendrait 1 ppm d'uranium en équilibre radioactif.

La conversion de la radioactivité de coups par seconde en U<sub>r</sub> répond à la formule suivante :

$$U_r = \frac{N - n}{a_u}$$

- . N = le "total count" en C/sec.
- . n = le bruit de fond régional soit environ 10 coups par seconde, selon les essais effectués par le laboratoire de Minéralogie de la F.P.Ms (CHARLET, DRUMEL, QUINIF et YANS, 1982)
- . a<sub>u</sub> = coefficient de calibrage du scintillomètre, établi à partir de la dalle dopée en uranium

On détermine a<sub>u</sub> de la façon suivante :

$$a_u = \frac{TC_u - TC_b}{(U \text{ ppm})}$$

- . TC<sub>u</sub> : "total count" enregistré sur la dalle uranium
- . TC<sub>b</sub> : "total count" enregistré sur la dalle de béton

La dalle Uranium est dopée par 36 ppm d'U . A partir des mesures faites régulièrement, on obtient les comptages moyens sur la période considérée. On obtient ainsi

$$a_u = \frac{130,27 - 18,09}{36} = 3,11$$

Finalement, on applique (pour la période du 23.11.82 au 20.06.84) :

$$U_r = \frac{N - 10}{3,11}$$



### ANNEXE III

#### PROSPECTION HYDROLOGIQUE

##### TABLEAUX DES TAUX DE COMPTAGE

Dans ces tableaux figurent les taux de comptage mesurés ou calculés de 48 points d'échantillonnage visités entre les mois de novembre 1983 et 1984.

Pour des raisons techniques (nombre limité de bouteilles disponibles, durée du temps de travail sur le terrain), il m'a été impossible d'échantillonner tous les points lors de chaque sortie. De ce fait, j'ai cherché à estimer, à partir des mesures faites un jour y, le taux de comptage qui aurait été celui des points non échantillonnés ce même jour .

Le calcul fait est le suivant :

$$A_{Si} J_y = A_{Si} J_z \cdot R$$

avec  $A_{Si} J_y$  = activité d'une source i au jour y

$A_{Si} J_z$  = activité mesurée de la source i un jour z

$$R = \text{moyenne des } r = \frac{A_{Sn} J_y}{A_{Sn} J_z}$$

où  $A_{Sn} J_y$  = activité d'une source n au jour y

$A_{Sn} J_z$  = activité d'une source n au jour z

Ces deux derniers termes étant mesurés.

De fait, si on se fie aux résultats obtenus en comparant mesures et calculs sur une même source (voir exemple en figure 1), on s'aperçoit que d'une façon générale, la tendance est à la sous-estimation de l'activité.

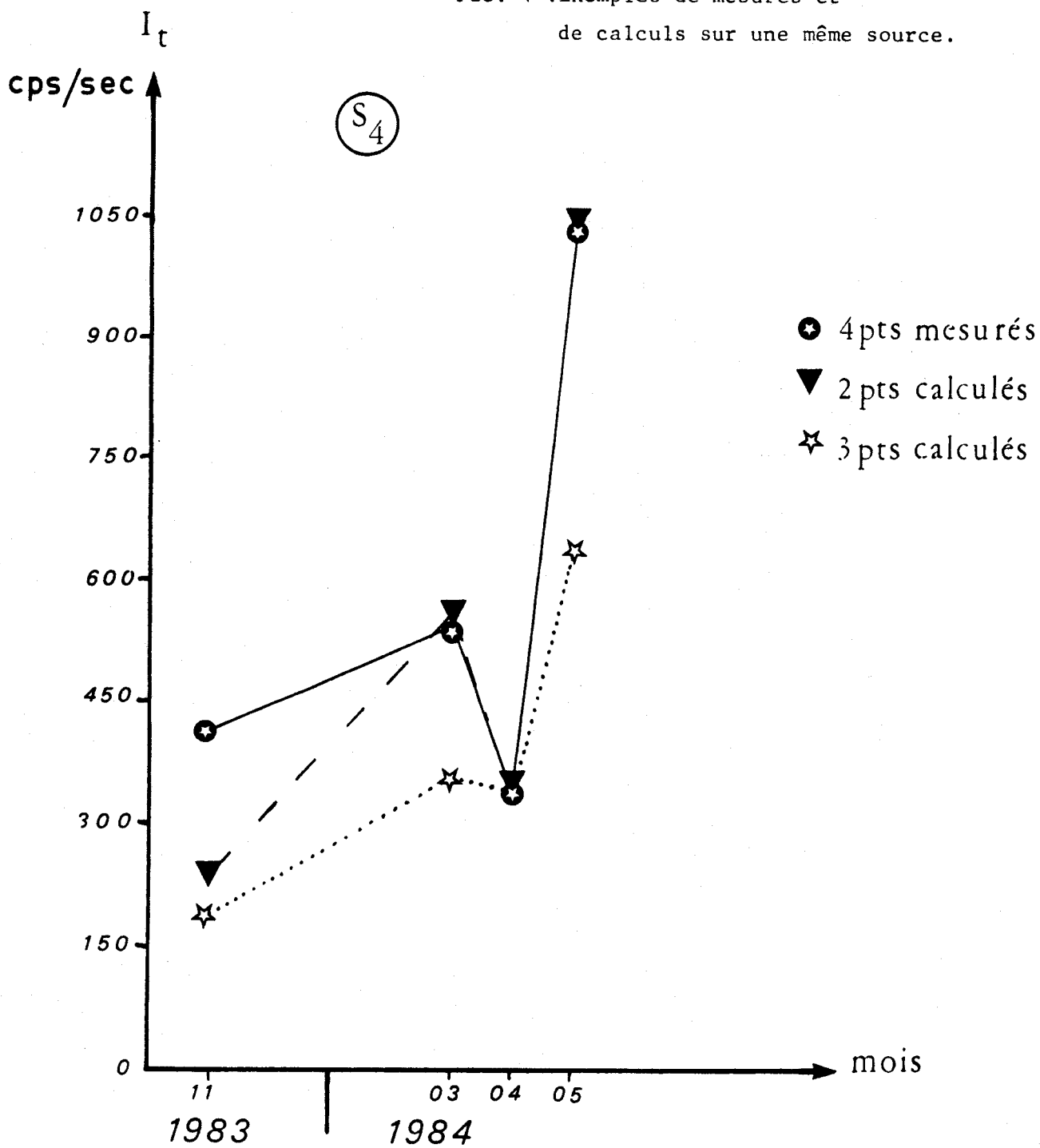
Signification des symboles rencontrés dans les tableaux :


- : Sources
- : Ruisseaux
- △ : Fontaine
- : Puits

500 : Activité mesurée en Cps/mn


500 : Activité calculée en Cps/mn

FIG. 1 : Exemples de mesures et de calculs sur une même source.



	11 83	03 84	04 84	05 84	06 84
○ 1	149	636	473	719	562
■ 2	58	101	75	162	133
○ 3	55	118	60	164	78
○ 4	414	544	340	1031	615
○ 5	100	212	55	320	228
○ 6	123	454	257	500	296
○ 7	287	666	500	920	636
○ 8	391	681	570	1033	831
○ 9	48	101	96	140	99
○ 10	362	711	596	842	620
○ 11	77	166	145	243	119
○ 12	205	436	414	601	309
○ 13	165	345	310	538	329
○ 14	59	249	120	5	116
○ 15	183	344	341	654	336
○ 16	192	337	409	610	212
○ 17	148	351	280	418	253
○ 18	148	314	298	433	264
○ 19	475	1104	828	1254	755
○ 20	424	757	1031	1112	745
○ 21	155	360	496	361	283
○ 22	259	493	469	862	723
○ 23	139	322	242	444	368
○ 26	159	334	303	482	290

	07 84	08 84	09 84	10 84	11 84
○ 1	161	436	411	382	641
■ 2	15	147	53	53	77
○ 3	82	127	92	95	151
○ 4	672	944	561	628	933
○ 5	124	231	131	151	296
○ 6	249	421	126	311	659
○ 7	557	777	521	617	875
○ 8	730	898	620	795	820
○ 9	86	112	81	96	127
○ 10	450	524	466	457	999
○ 11	104	171	47	60	115
○ 12	271	411	253	435	635
○ 13	189	379	196	222	341
○ 14	101	197	95	112	149
○ 15	566	563	588	666	1024
○ 16	185	446	174	320	372
○ 17	222	337	208	246	326
○ 18	250	312	229	250	400
○ 19	957	1195	565	1023	1269
○ 20	543	1347	650	834	1215
○ 21	283	446	295	334	513
○ 22	633	875	344	519	758
○ 23	265	43	223	333	490
○ 26	385	529	400	453	697

	11 83	03 84	04 84	05 84	06 84
○ 27	98	205	195	280	167
○ 28	219	468	356	775	297
■ 29	21	40	38	70	44
■ 30	63	121	115	211	131
■ 31	22	52	39	72	43
○ 32	311	723	542	998	702
○ 33	162	362	272	500	121
○ 34	178	414	310	571	255
△ 36	26	60	45	83	50
△ 37	50	118	88	162	98
△ 38	59	137	103	190	114
○ 39	84	228	168	116	192
■ 40	46	126	93	64	106
○ 41	571	894	918	1406	813
■ 42	3	7	4	8	5
■ 43	87	202	112	245	160
□ 44	360	838	465	1018	664
□ 45	163	381	211	462	302
□ 46	242	565	312	685	447
■ 47	51	120	66	145	95
■ 48	72	168	93	203	132
△ 49	279	500	369	652	445
△ 50	71	127	94	166	113
■ 51	21	40	30	55	33





	07 84	08 84	09 84	10 84	11 84
○ 27	17	290	17	20	29
○ 28	299	788	352	395	577
■ 29	29	240	126	185	273
■ 30	86	120	63	48	69
■ 31	36	59	40	41	66
○ 32	565	766	613	532	982
○ 33	106	258	150	191	250
○ 34	223	394	320	248	329
△ 36	37	14	7	181	156
△ 37	184	323	167	197	322
△ 38	326	360	165	311	473
○ 39	168	241	157	186	247
■ 40	93	133	87	103	136
○ 41	711	1064	801	1271	683
■ 42	4	7	4	5	8
■ 43	119	201	105	156	229
□ 44	495	834	438	220	321
□ 45	225	379	81	341	497
□ 46	333	561	68	11	114
■ 47	71	119	63	93	135
■ 48	99	167	317	129	190
△ 49	51	695	365	622	466
△ 50	89	177	93	119	156
■ 51	27	41	25	32	46

## A N N E X E I V

### LA SPECTROMETRIE GAMMA

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 qu'ont été traités et analysés mes échantillons.

#### 1. Appareillage de spectrométrie gamma

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

- un détecteur à cristal scintillant NaI (Tl) 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 couplée par une interface à un micro-ordinateur a été développée et sera prochainement mise en routine).

Remarque : Le détecteur est placé dans un château de plomb (50 x 50 x 70cm, 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.

## 2. Dosage des échantillons

### 2.1. 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

### 2.2. Etalonnage en concentration

#### 2.2.1. Choix des raies

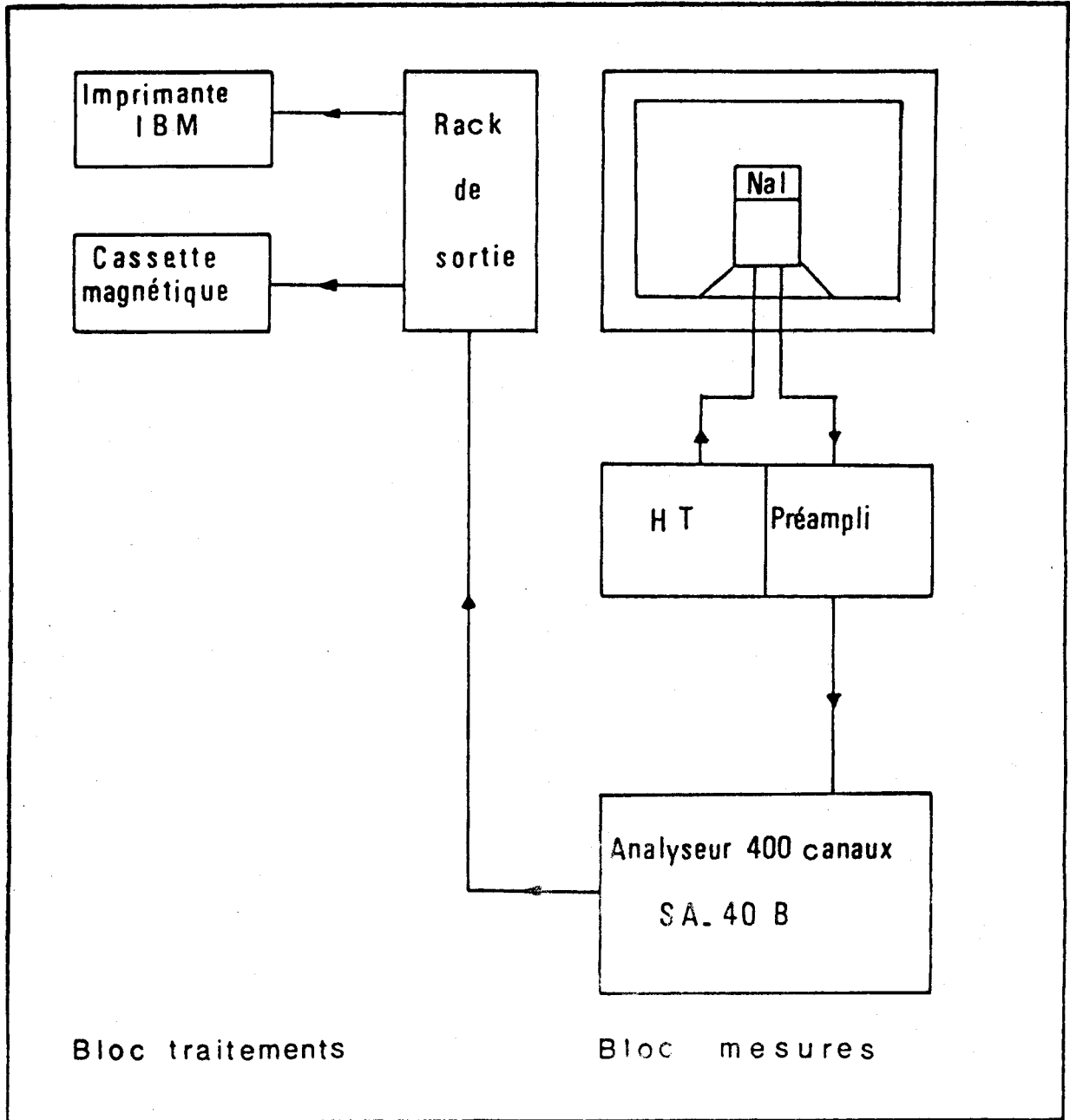
Pour le dosage U-Th-K, les raies suivantes ont été choisies :

- pour le potassium, la raie à 1,460 MeV : c'est la seule raie photoélectrique du  $K_{40}$  - 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' $^{235}\text{U}$  et du  $^{226}\text{Ra}$  est utilisée pour le calcul de l'équilibre radioactif.

#### 2.2.2. Droites de corrélation

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 effectué de manière à couvrir le domaine de teneurs habituelles des roches les plus courantes:

- pour le potassium de 0 à 6 % exprimé en  $K_2O$ ,
- pour l'uranium de 0 à 30 ppm exprimé en U métal,
- pour le thorium de 0 à 25 ppm.



Représentation schématique de l'appareillage de spectrométrie gamma, d'après NDZIBA (1982).

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 930 keV du Th et la raie à 1,46 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.

$$\begin{aligned} H(610) - H'(610) &= 24,724 \text{ Th} + 79,225 \text{ U (Ra)} + 36,682 \text{ K} \\ H(930) - H'(930) &= 18,744 \text{ Th} + 15,117 \text{ U (Ra)} + 39,203 \text{ K} \\ H(1460) - H'(1460) &= 2,216 \text{ Th} + 10,240 \text{ U (Ra)} + 145,270 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(1120) - H'(1120) &= 4,290 \text{ Th} + 17,888 \text{ U (Ra)} + 45,491 \text{ K} \\ H(930) - H'(930) &= 18,744 \text{ Th} + 15,117 \text{ U (Ra)} + 39,203 \text{ K} \\ H(1460) - H'(1460) &= 2,214 \text{ Th} + 10,240 \text{ U (Ra)} + 145,270 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(295) - H'(295) &= 50,316 \text{ Th} + 187,530 \text{ U (Ra)} + 79,796 \text{ K} \\ H(930) - H'(930) &= 18,744 \text{ Th} + 15,117 \text{ U (Ra)} + 39,203 \text{ K} \\ H(1460) - H'(1460) &= 2,214 \text{ Th} + 10,240 \text{ U (Ra)} + 145,270 \text{ K} \end{aligned}$$

$H(610), H(930), H(1460) \dots$  = intensité des raies 610 - 930 - 1460 keV  
 $H'(610), H'(930), H'(1460) \dots$  = bruit de fond pour les mêmes raies

Les facteurs numériques correspondent au coefficient angulaire des droites d'étalonnage regroupés dans les tableaux suivants n° 1 et n° 2.

	0,930		1,120		1,460	
	a	r	a	r	a	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
K	39,203	0,9971	45,491	0,9974	145,270	0,9990

Tableau n° 1

	0,184		0,295		0,350		0,610	
	a	r	a	r	a	r	a	r
U	199,820	0,9998	187,530	0,9998	205,370	0,9999	79,225	0,9999
Th	82,979	0,9995	50,316	0,9996	42,582	0,9996	24,724	0,9995
K	119,650	0,9908	79,796	0,9818	42,784	0,7794	36,682	0,9937

a = coefficient angulaire des droites d'étalonnage

r = coefficient de correction

Tableau n° 2

### 2.3. 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 résout 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<sup>+</sup>.

+ 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.

## ANNEXE V

### ANALYSE EN AUTORADIOGRAPHIE

#### 1. PRESENTATION ET BUT DE L'ANALYSE

On a vu en première partie (Chapitre II) et troisième partie (Chapitre V) les applications des films sensibles aux émissions alpha. Dans le cadre de mes travaux, ces films n'ont été utilisés que pour la réalisation d'autoradiographies d'échantillons de roches, d'encroûtements ferrugineux et de frottis de sédiments meubles ou de minéraux extraits de roches broyées.

L'objet de l'analyse était de localiser et de tenter de déterminer les sources de haute radioactivité de mes échantillons. Pour appliquer ces techniques, je me suis appuyé sur les travaux de BASHAM *et al* (1977), DUANE (1980), BASHAM (1981), DORCHIES (1984).

#### 2. LES MATERIAUX SENSIBLES UTILISES

J'ai pu utiliser des films de 3 types. Leur point commun est leur sensibilité au rayonnement alpha. Ils diffèrent sur leurs supports et quelques modalités d'emploi.

. le film Kodak L.R. 115 type 2 est constitué d'une pellicule de 12  $\mu\text{m}$  de nitrate de cellulose appliquée sur un support de polyester de 100  $\mu\text{m}$ . Le nitrate est fortement coloré en rouge. Ses avantages sont :

- la facilité d'observation des impacts par contraste de couleur,
- la possibilité de détacher la couche de nitrate pour réaliser des comptages par étincelage.

. le film Kodak C.N. 85. C'est un film incolore de nitrate de cellulose d'une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ .

. le polymère C.R. 39 : c'est une plaque de 1 mm d'épaisseur, transparente. Il est facile à manipuler du fait de sa rigidité. Il est plus sensible au rayonnement alpha que les 2 précédents. C'est sur ce type de film que j'ai obtenu les meilleurs résultats.

Pour ces trois détecteurs, les traces ne sont pas observées directement, un petit traitement chimique est réalisé. La technique appliquée au Laboratoire de la F.P.Ms est la suivante :

- 1/2 heure d'attaque à la soude caustique à 10 % (2.5 N) à la température de 60°C;



- lavage à l'eau pendant une 1/2 heure au minimum.

Le seuil de détection étant de l'ordre de 100 ppm d'eU, les films sont, à Mons, classiquement appliqués pendant 3 semaines.

### 3. Techniques d'analyse

Les conditions optimales d'analyse sont réalisées lorsque le contact film-échantillon est le plus uniforme possible, ceci pour tenir compte des faibles pénétrations et dispersions des rayons alpha.

Pour cela, toutes les applications de films sont réalisées soit sur surfaces polies d'échantillons de roche massive, soit sur lames minces ou frottis polis mais non couverts.



# ANNEXE VI

## L'ANALYSE EN ANTICOINCIDENCE

### 1. Appareillage employé

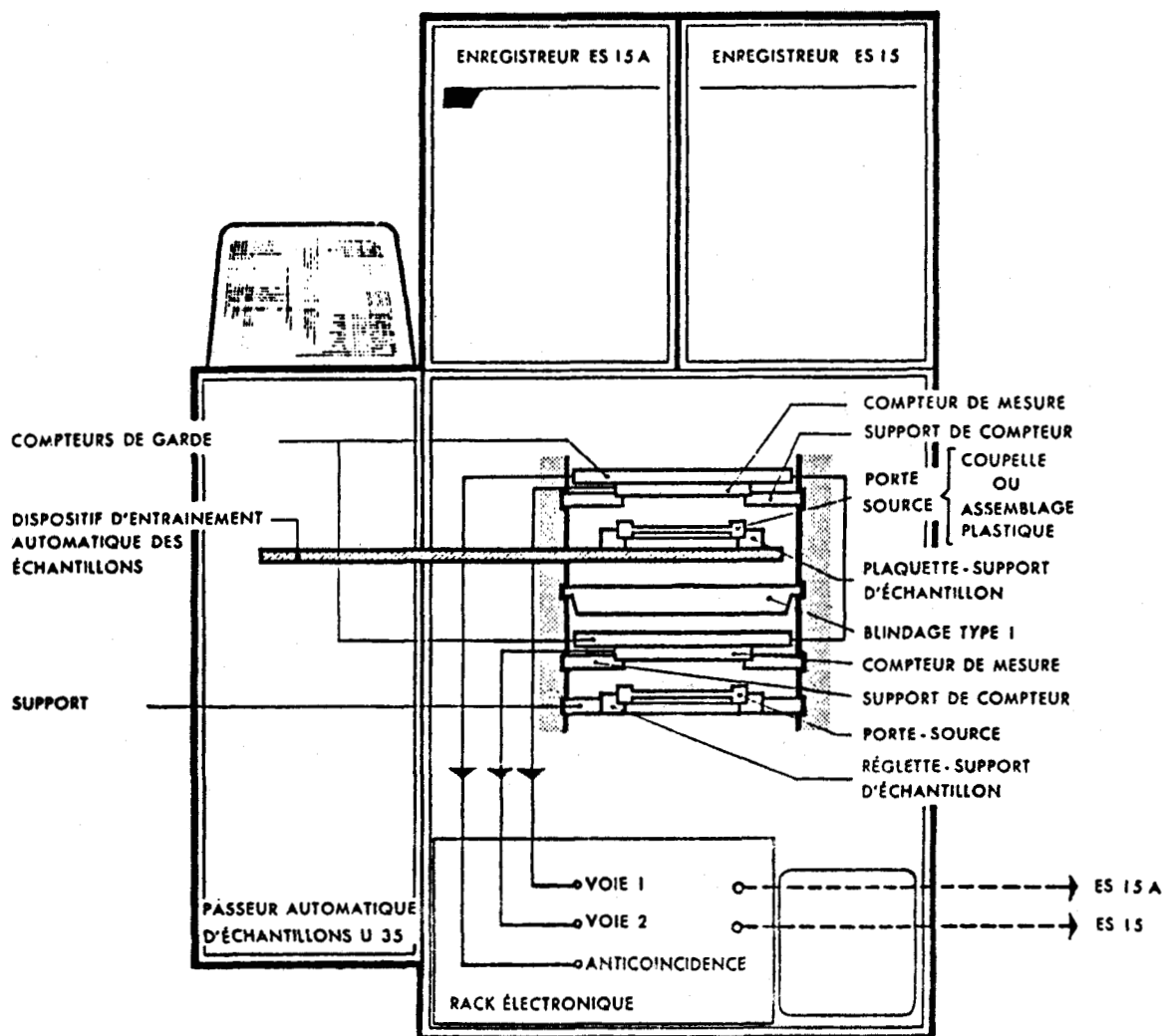


Schéma de l'appareillage employé lors des analyses en anticoincidence, d'après le catalogue Intertechnique.

L'appareillage, employé par la Faculté Polytechnique de Mons est l'ensemble de comptage de faibles activités bêta du type RA 12 fabriqué par Intertechnique (à Plaisir en Seine-et-Oise). Il est représenté à la figure ci-dessus, tirée des catalogues de la maison-mère. La sortie sur

enregistreur a été remplacée par une sortie sur imprimante avec sortie automatique des résultats (réalisation du Centre d'Instrumentation Electronique de la F.P.Ms.).

## 2. Fiabilité de l'appareillage

Afin de tester la fiabilité de l'appareil, nous avons procédé à l'enregistrement du taux de radioactivité, sur des poids croissant d'un même échantillon (S-310). Nous avons observé (figure ci-dessous) une augmentation linéaire de ceux-ci proportionnellement aux poids ( $R = 0,989$ ).

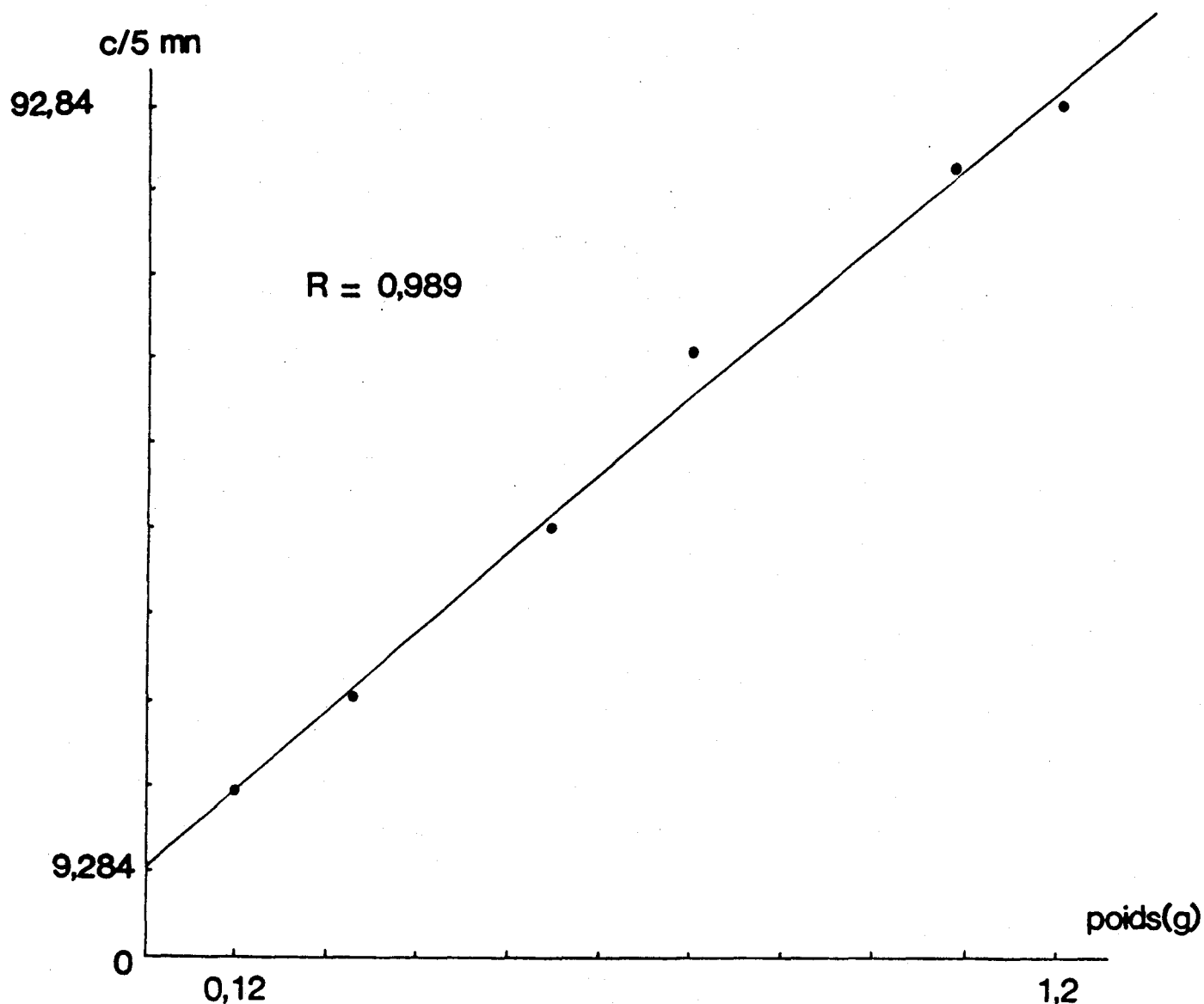


fig. 2.- Proportionnalité de la radioactivité vis à vis de la masse d'échantillon (cas d'un échantillon de L. DORCHIES, 1984).

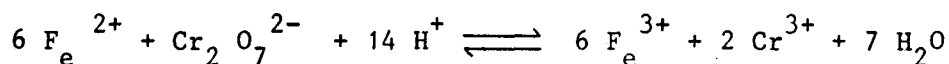


## ANNEXE VII

### DOSAGE DU FER TOTAL

#### 1, PRINCIPE

L'échantillon à titrer est attaqué par HCl concentré. Le fer est ramené à l'état ferreux ( $\text{Fe}^{3+}$ ) et est titré par le bichromate de potassium ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) suivant la réaction :



$\text{Sn}^{2+}$  est utilisé comme catalyseur. L'excès de  $\text{Sn}^{2+}$  (le plus faible possible) est éliminé par addition d'ion  $\text{Hg}^{2+}$  et formation d'un précipité de Calomel ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ).

On améliore le titrage proprement dit par addition d'un peu de solution de Zimmerman contenant des ions  $\text{Mn}^{2+}$  (retardant l'oxydation de  $\text{Cl}^-$ ) et de l'acide phosphorique (éliminant la coloration gênante de  $\text{Fe}^{3+}$ ).

#### 2. CONDITIONNEMENT DE LA ROCHE

Les échantillons sont finement broyés (comme pour la spectrométrie gamma).

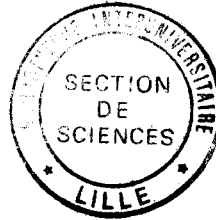
On pèse une quantité précise de poudre :

- . 1 gr dans le cas des fractures minéralisées,
- . 3 gr dans celui des roches.

Cette masse est dissoute dans un excès d'acide chlorhydrique pur (60 ml).

Après dissolution totale, on complète à 250 ml obtenant ainsi la solution mère à titrer.





ANNEXE VIII

ANALYSES DU MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE

91/11/77

MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE ET DE LA FAMILLE

MINISTERIE VAN VOLKSGEZONDHEID EN VAN HET GEZIN

I.N.E. - Département de l'Environnement  
- Section Radioactivité

I.N.E. - Departement van Leefmilieu  
- Afdeling Radioactiviteit

14 Rue Juliette Wytsman  
1050 BRUXELLES

14 Juliette Wytsmanstraat  
1050 BRUSSEL

ANALYSE DE RADIOACTIVITE  
RADIOAKTIVITEITSONTLEDING

Conversion  
Conversion pCi-Bq  
pCi x 0,037 = Bq

MOIS DE NOVEMBRE 1984  
MAAND VAN NOVEMBER 1984

- Analyse demandée par  
Ontleding aangevraagd door :  
- Echantillons prélevés par :  
Monsters afgenomen door :

N° Nr	Désignation de l'échantillon Aanduiding van het monster	Réception laboratoire Ontvangst laboratorium	Alpha total Totale Alpha		Radium 226		Bêta total Totale Bêta		Potassium 40 Kalium 40		Radon 222		Rauon 222		Caesium 137 Cesium 137		Iode 131 Iodium 131	
			<sup>1</sup> pCi/l	<sup>2</sup> Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	<sup>1</sup> pCi/l	<sup>2</sup> Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>
R 512	Fontceeu en Ardenne Fontaine du Pauge 11 h 50	27.11.84	19,8	0,73	1,29	0,048	5	0,185	0,7	0,026	9260	347,1	6020	223				
R 513	Six Plans 12 h 46	27.11.84	12,9	0,48	0,32	0,012	19	0,70	6,1	0,226	5176	192	5350	198				
R 514	Chairières 13 h 10	27.11.84			0,04	0,001	3	0,11	0,5	0,02			2106	76				

<sup>1</sup> méthode par estimation des produits de filiation  
<sup>2</sup> méthode par émanation  
<sup>3</sup> résultat après 48 h

BRUXELLES, le  
BRUSSEL, de

18.02.1985

*J. J. J. J.*

N° Nr	Désignation de l'échantillon Aanduiding van het monster	Réception laboratoire Ontvangst laboratorium	Alpha total Totale Alpha		Radium 226		Bêta total Totale Bêta		Potassium 40 Kalium 40		Radon 222		Tritium		Rauon 222	
			<sup>3</sup> pCi/l	<sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>	<sup>1</sup> pCi/l	<sup>2</sup> Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	Bq/m <sup>3</sup>
R 545	Lavoir Chairier F 37	12.12.1984	1,9	0,07	0,02	0,001	1	0,037	0,5	0,019	1620	59,9	< 172	< 6,36	-	
R 546	Fontaine du Pauge	12.12.1984	27,3	1,01	0,16	0,006	1	0,037	0,8	0,030	9166	339	< 172	< 6,36	8747	324
R 553	Source 20	12.12.1984	19,4	0,72	0,13	0,005	1	0,037	0,6	0,022	5750	213	275	10,18	7356	273
R 560	Fontaine 49 Otzy	12.12.1985	11,4	0,42	0,22	0,008	3	0,111	0,4	0,015	2970	109,9	< 172	< 6,36	3302	122
R 547	S 7	12.12.1985	18,7	0,69	0,27	0,010	2	0,074	0,6	0,022	4800	178	< 173	< 6,40	5595	222

<sup>1</sup> méthode par estimation des produits de filiation  
<sup>2</sup> méthode par émanation  
<sup>3</sup> alpha mesures après 24 h  
<sup>4</sup> alpha mesures après 10 j.

BRUXELLES, le  
BRUSSEL, de

05.03.1985

*J. J. J. J.*



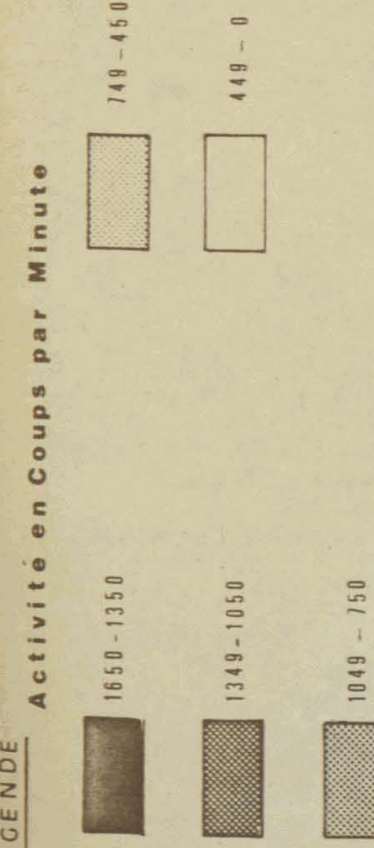
FIGURE II : Prospection

Hydrologique,

Evolution mensuelle des concentrations en Radon.



LEGENDE



- B Ballamont
- Ch Chailrière
- M Monceau
- O Olzy
- OH Orchimont
- S.P Six Plaines
- V Vresse
- Localités
- Cours d'eau

○ Sources Puits

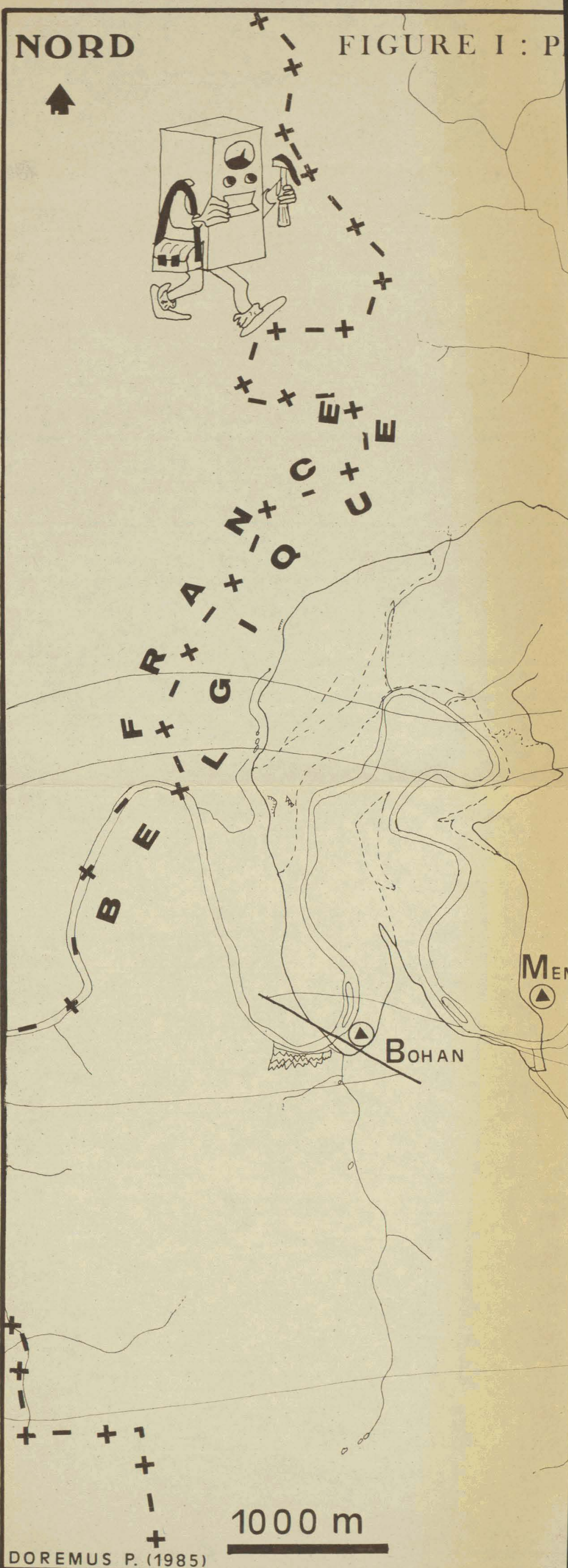
1000m



NORD

FIGURE 1 : PROSPECTION SCINTILLOMETRIQUE

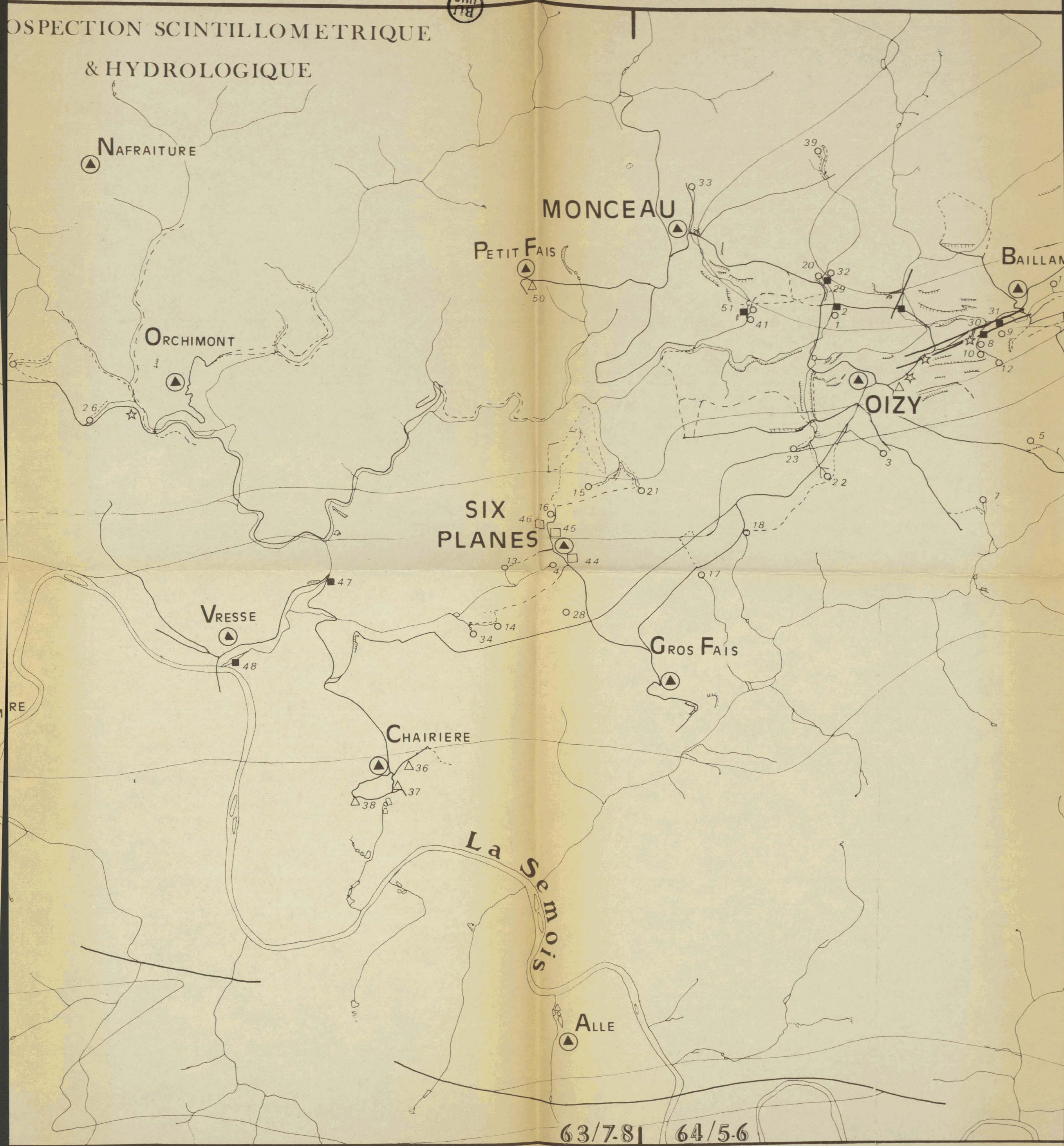
& HYDROLOGIQUE



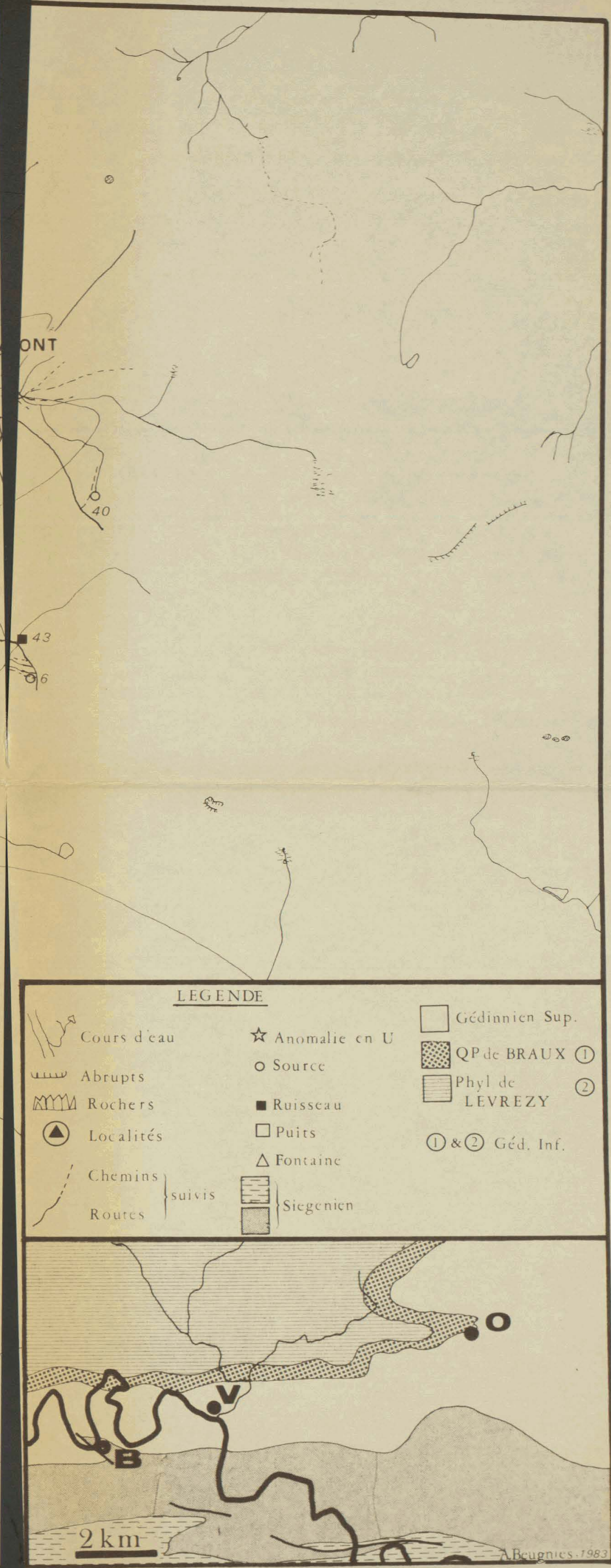
DOREMUS P. (1985)

1000 m

BRU  
LILLE

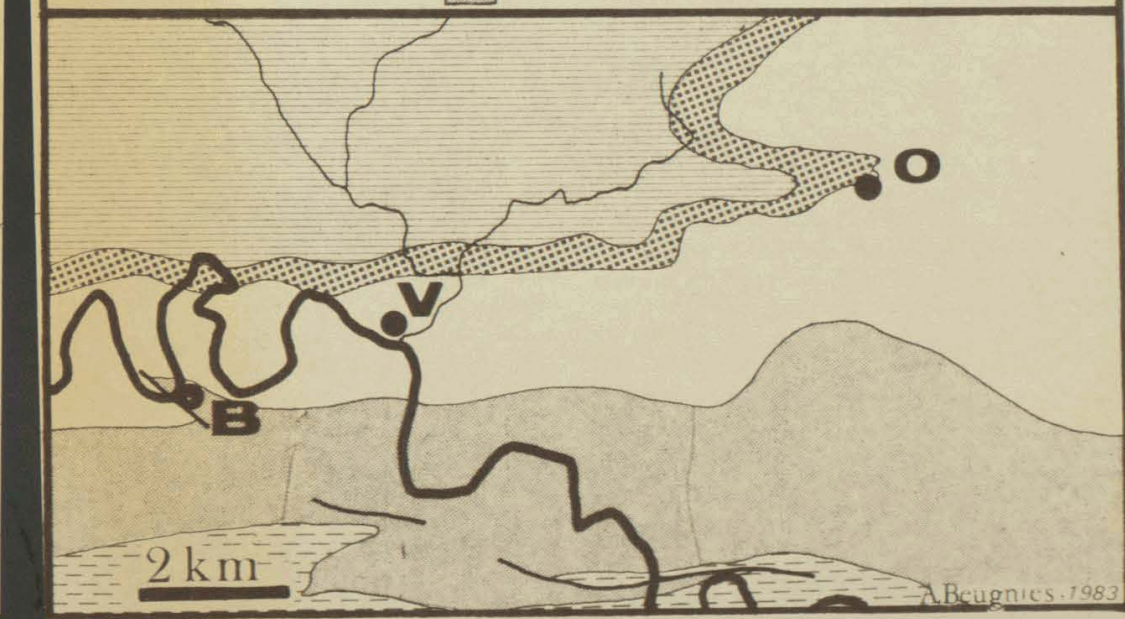


63/7.8 | 64/5.6



LEGENDE

Cours d'eau	Anomalie en U	Gédinnien Sup.
Abrupts	Source	QP de BRAUX ①
Rochers	Ruisseau	Phyl de LEVREZY ②
Localités	Puits	① & ② Géd. Inf.
Chemins	Fontaine	
Routes	Siegenien	

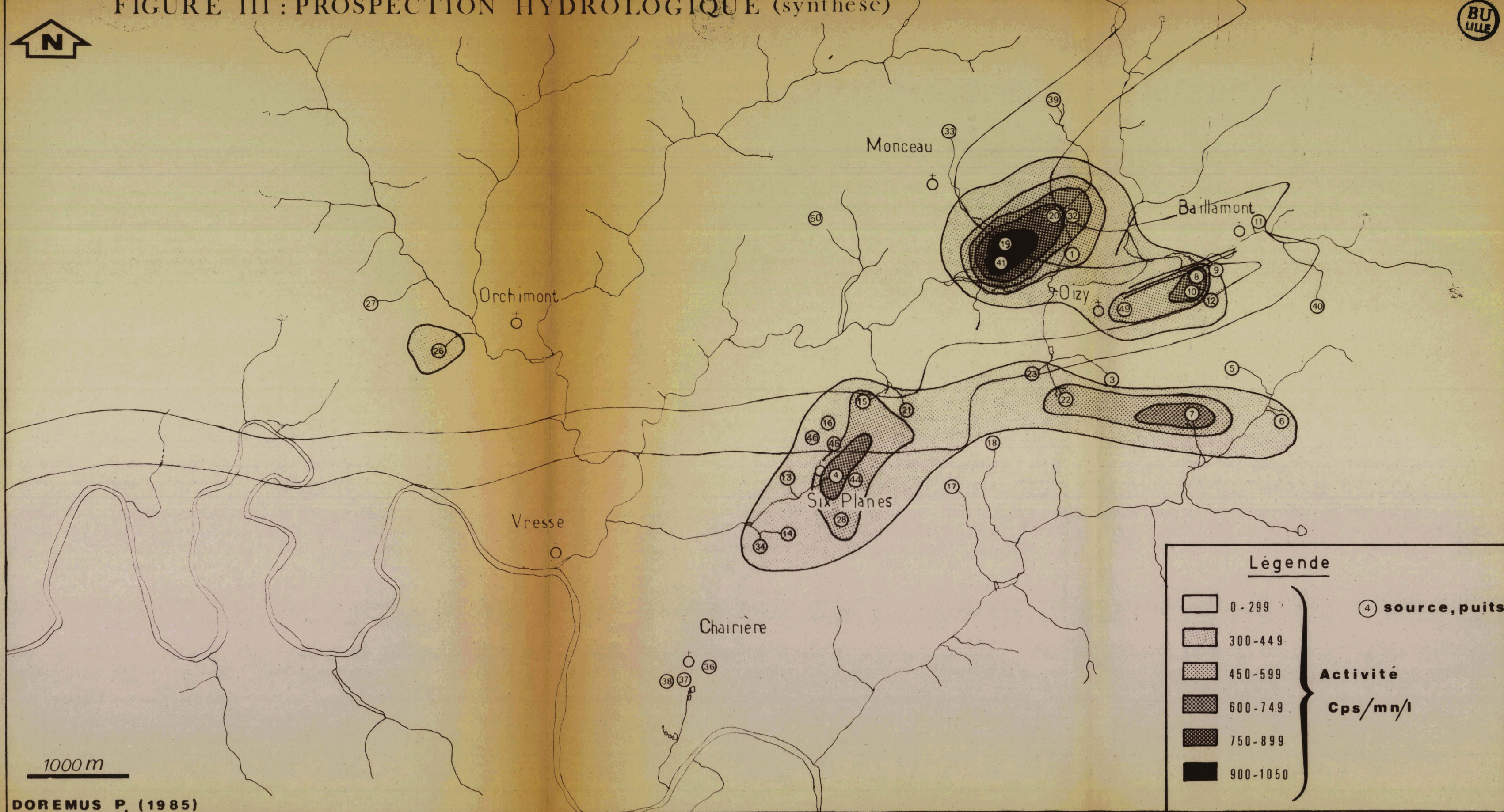


Abagnies 1983



FIGURE III : PROSPECTION HYDROLOGIQUE (synthèse)

BU  
LILLE



**Légende**

	0 - 299	} <b>Activité</b> <b>Cps/mn/l</b>	⊙ <b>source, puits</b>
	300 - 449		
	450 - 599		
	600 - 749		
	750 - 899		
	900 - 1050		

1000 m

DOREMUS P. (1985)