

SUR LA TENEUR EN URANIUM DES SÉDIMENTS DU BASSIN OCCIDENTAL DE LA MÉDITERRANÉE

par M. GOLDSZTEIN* et J. ROS**

La teneur en uranium des sédiments marins présente un double intérêt. C'est d'abord une donnée essentielle pour la connaissance de la balance géochimique de l'uranium et de toute la famille de ses descendants, d'autre part, la connaissance de la teneur en uranium est un facteur nécessaire pour l'application des nouvelles méthodes géochronologiques basées sur la décroissance en fonction du temps des rapports Ionium/Thorium (PICCIOTTO et WILGAIN 1954; GOLDBERG et KOIDE 1958, 1962; BARANOV et KUZMINA 1958) et Protactinium/Ionium (ROSHOLT *et al.* 1961) que nous étudions actuellement dans nos laboratoires.

La source principale d'uranium de la mer est constituée par les roches ignées (granites) de l'écorce terrestre. Une partie importante de cet uranium (60 à 80 %) est transportée jusqu'au sédiment sous forme de minéraux du granite (zircon, monazite, etc...) très résistants du point de vue mécanique et chimique; 15 à 40 % de l'uranium des roches ignées est oxydé en ion uranyle, très soluble, par les agents d'érosion et transporté en solution jusqu'à la mer (ADAMS *et al.* 1959).

Les premières mesures d'uranium dans la mer sont dues à HERNEGGER (1933) puis à HERNEGGER et KARLIX (1935). Leurs résultats ont été confirmés par de nombreux auteurs. On admet pour l'eau de mer une valeur moyenne de la teneur en uranium de 2×10^{-9} g/ml.

On ne connaît pas encore bien les réactions chimiques qui prennent place lors du passage de l'uranium des solutions aqueuses vers le sédiment. L'uranium peut être extrait des solutions par précipitation directe sous forme de composés insolubles. Il est adsorbé par différents matériaux, principalement par les argiles présentant des structures en feuillets (FREDERICKSON 1948), par les matériaux organiques (MCKELVEY et NELSON 1950; BREGER et DEUL 1956) et, apparemment en quantités moins importantes, par les gels de fer, d'aluminium, de manganèse et de silice. L'uranium peut remplacer isomorphiquement le calcium dans certains minéraux, par exemple dans les phosphates de calcium des sédiments marins phosphatés.

La distribution de l'uranium dans les sédiments et dans les roches sédimentaires montre que la séparation de la solution aqueuse a lieu dans des milieux réducteurs en présence de matière organique et de sulfures et en absence d'oxygène dissous. Aussi bien les expériences de laboratoire que les observations géologiques montrent que la précipitation ou l'adsorption de l'uranium est inhibée par la présence des ions carbonates (ADAMS et WEAVER 1958).

ARRHENIUS, BRAMLETTE et PICCIOTTO (1957) ont étudié la localisation des nuclides radioactifs émetteurs α dans les sédiments pélagiques. Ils en concluent la répartition suivante :

1^o) 10 % des particules α sont émises par de petits cristaux d'environ 1 micron qui sont probablement de la baryte;

2^o) 15 % de l'activité proviennent de matériaux agglomérés (3 à 10 microns) qui sont peut être les « fecal pellets » d'animaux benthiques;

* Service de Minéralogie — D.P.R.M. Fontenay-aux-Roses.

** Centre des Faibles Radioactivités — C.N.R.S. Gif-sur-Yvette.

3^o) 25 % de l'activité sont associés aux débris des squelettes des poissons. BOWIE et ALKIN (1956) ont trouvé dans un squelette de poisson fossile 2 700 ppm d'uranium et 4 500 ppm de thorium;

4^o) les 50 % restant n'ont pas de source visible. On suppose qu'ils indiquent la présence de nuclides radioactifs dispersés dans la masse des sédiments.

L'opale biogène (diatomées et radiolaires) ne présente pas d'activité.

Le tableau I donne la teneur en uranium des sédiments marins.

Origine	U total (ppm)
Sédiments Atlantique (URRY 1941)	1-3
Sédiments Pacifique (HECHT in KRÖLL 1955)	2,7
Sédiments Atlantique (HECHT in KRÖLL 1955)	2,3
Sédiments Pacifique (BARANOV et KUZMINA 1958)	3,3
Sédiments Atlantique (ROSHOLT <i>et al.</i> 1961)	1,0

TABLE I. — Teneur en uranium des sédiments marins.

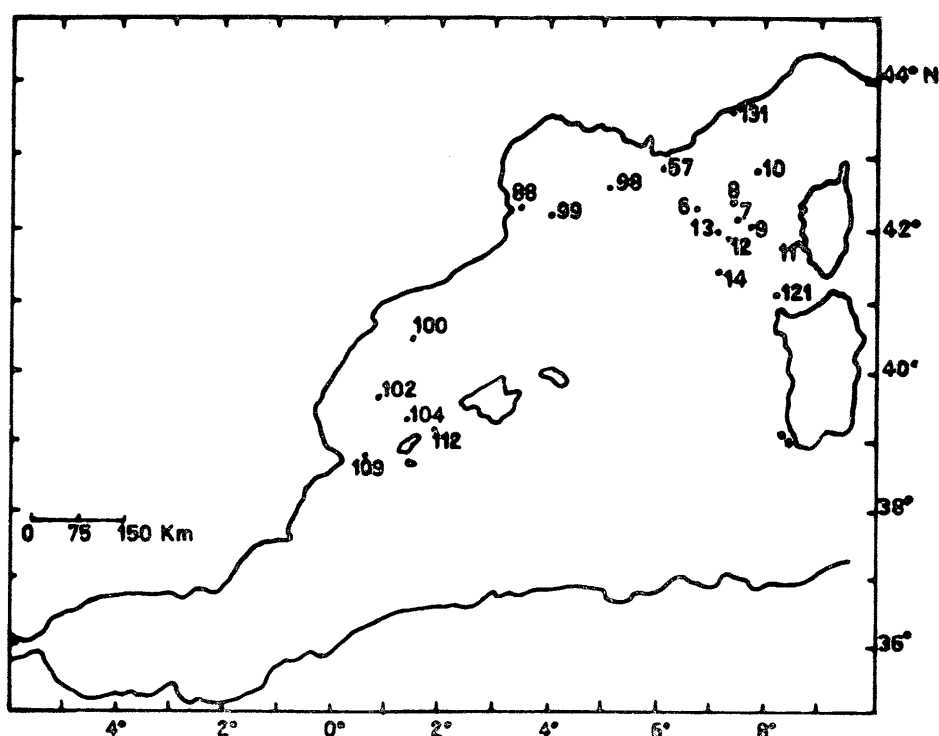


FIG. 1. — Position des carottages.

Nous avons dosé dans 340 échantillons provenant du bassin occidental de la Méditerranée l'uranium total et l'uranium soluble dans une solution d' HNO_3 , 2M. La méthode d'analyse utilisée est la fluorimétrie CETAMA, n^o 44, 1962.

Résultats.

1^o) Région des Baléares (tabl. II).

Dans cette région nous avons étudié 5 carottes prélevées par le N.O. « Origny ». La teneur moyenne en uranium total est de 2,2 ppm. Les valeurs varient de 1,4 à 3,5 ppm et la déviation standard $\sigma = \pm 0,45$, soit 20 %.

La teneur moyenne en uranium soluble est de 1,4 ppm ce qui correspond à 63 % de l'uranium total.

2^o) Région du plateau continental français, du cap Creus au cap Ferrat (tabl. III).

Nous avons analysé 5 carottes prélevées par le N.O. « ORIGNY ». La teneur moyenne en uranium total est de 2,3 ppm, les valeurs extrêmes étant 2,6 et 3,7 et $\sigma = \pm 0,54$, soit 23 %.

La teneur en uranium soluble est de 1,4 ppm, le rapport uranium soluble/uranium total est de 60 %.

La carotte n^o 57 située à proximité du cap Garonne présente la plus forte teneur en uranium de cette série avec 2,8 ppm de teneur moyenne et 3,7 ppm de teneur maximum. Ces valeurs peuvent s'expliquer par la présence à proximité du cap d'un gisement d'uranium (ROUBAULT 1958).

Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)
100	0-8	Vase	2,0	1,0
	8-14		2,0	1,0
	16-21		2,8	1,4
	21-30		2,4	1,6
	30-43		2,4	1,6
	43-53		2,8	1,5
	53-70		3,0	1,9
102	0-11	Vase	2,2	0,9
	11-22		2,6	1,2
	22-34		2,3	1,2
	34-48		2,2	1,3
	48-64		2,3	1,3
	64-82		2,0	1,4
	104		0-20	Vase
20-40		3,5	3,0	
40-70		2,5	2,3	
109	0-23	Vase	2,4	2,0
	23-43		2,8	2,5
	43-63		2,7	1,6
	63-81		2,7	1,8
112	0-25	Vase	1,4	0,7
Moyenne			2,2	1,4

TABL. II. — Teneur en uranium des sédiments de la région des Baléares.

Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)
57	0-17	Vase	2,0	1,0
	17-35		2,8	1,9
	35-53		2,9	2,6
	53-69		3,7	3,0
	88		0-20	Vase
98	0-16	Vase	1,6	0,9
	16-30		1,7	0,9
	20-32		3,4	3,4
	32-47		2,7	2,4
	47-50		2,6	2,3
99	0-8	Vase	1,9	1,2
	8-20		2,0	1,3
	20-30		1,8	1,0
	30-40		2,0	1,2
	40-50		1,7	1,2
	50-60		1,7	1,2
	60-71		1,9	1,0
71-83	1,9	1,3		
131	0-8	Vase	2,0	0,9
	8-17		2,3	0,9
	17-24		2,6	0,9
	24-34		2,7	0,9
	34-46		2,3	0,8
	46-60		2,4	1,2
	60-72		2,5	1,2
Moyenne			2,3	1,4

TABL. III. — Teneur en uranium des sédiments du plateau continental français.

Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)	Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)	
6	0-15	Vase	4,3	1,6	10	0- 20	Sable	2,7	0,6	
	15-20	—	2,7	0,7		20- 27	Vase	1,8	0,6	
	20-27	Sable	2,9	0,6		53- 64	—	2,3	0,9	
	40-50	—	2,2	0,8		98-116	—	2,0	0,5	
	50-60	—	4,1	1,1		162-180	—	2,3	0,9	
	70-78	—	1,4	0,9		245-265	—	2,2	0,8	
	78-81	—	1,7	0,7		315-329	—	2,4	0,6	
	81-91	Vase	2,3	0,8		329-333	—	2,6	0,6	
	91-99	—	3,7	3,0		Moyenne (vase)		2,2	0,7	
	99-102	—	2,3	0,9		12	3- 18	Vase	2,3	0,8
	102-112	—	2,1	0,8			21- 27	—	2,1	0,8
	112-114	—	2,3	0,7			27- 36	—	1,7	1,1
	114-124	—	2,4	0,7			42- 52	—	1,9	1,2
	134-151	—	2,6	0,6			54- 60	—	1,6	0,7
	161-184	Sable	2,4	1,0			72- 82	—	2,0	1,0
	184-185	—	4,1	—			82- 92	—	1,7	0,8
	185-205	—	3,5	1,6			92- 97	—	2,3	0,8
	205-218	Vase	3,3	1,0			97-100	—	3,9	1,8
	218-238	—	1,9	1,0			114-124	—	3,2	1,6
	238-258	—	2,4	1,9			131-138	—	2,5	1,4
	258-268	—	2,1	1,8			138-141	—	2,6	1,2
	268-278	—	2,2	1,6			144-148	—	2,1	1,0
	278-298	—	2,4	0,8			148-160	—	1,5	1,1
	298-315	—	2,8	1,2			170-179	—	2,2	0,6
	323-334	—	2,9	1,0			181-186	—	1,7	0,7
	334-336	—	2,2	1,2			186-193	—	2,7	0,7
	336-350	—	2,9	0,9			195-205	—	3,5	0,8
	350-357	Sable	2,4	1,2			205-214	—	2,9	0,7
369-389	Vase	2,5	0,9	214-225	Sable		3,1	0,9		
389-398	—	2,3	1,2	242-244	—		2,5	0,8		
398-410	Sable	1,4	1,0	244-264	Vase		3,2	0,7		
Moyenne (vase)			2,6	1,2	264-275		—	2,3	0,6	
Moyenne (sable)			2,6	1,0	277-297		—	3,0	0,6	
7	0- 20	Sable	2,4	1,1	297-317		—	2,6	0,6	
	40- 48	Vase	3,3	1,3	317-337		—	2,4	0,7	
	101-110	—	3,2	0,9	339-352		—	2,7	0,8	
	180-200	—	2,3	0,6	352-370		—	3,2	0,7	
	310-320	—	3,1	1,7	Moyenne (vase)		2,4	0,9		
	350-368	—	2,8	1,1	13	0- 3	Vase	2,2	0,6	
	Moyenne (vase)		2,9	1,1		3- 13	—	1,9	0,6	
	8	0- 20	Sable	1,9		1,2	13- 15	—	1,6	0,7
53- 59		Vase	3,1	1,4		15- 25	—	1,8	0,8	
107-114		—	2,5	0,7		25- 27	—	1,9	1,0	
200-211		—	3,1	2,0		30- 37	—	1,6	0,9	
300-310		—	2,4	0,7		37- 39	—	1,7	0,7	
Moyenne (vase)			2,7	1,2		39- 49	—	1,6	0,8	
9	0- 3	Vase	2,6	1,1	49- 51	—	3,3	0,8		
	43- 63	—	4,1	1,6	51- 61	—	2,2	0,7		
	200-220	—	3,6	1,3	61- 63	—	2,5	0,8		
	304-315	—	2,4	1,0	63- 73	—	2,3	0,9		
	365-370	—	2,2	1,0	73- 75	—	2,2	0,8		
	400-420	—	2,8	0,8	75- 85	—	2,4	0,6		
	530-535	—	4,2	2,1	85- 87	—	2,8	0,7		
	Moyenne (vase)		3,1	1,2	87- 97	—	2,8	1,2		
	10	0- 3	Vase	2,6	1,1	97- 99	—	2,4	0,8	
		43- 63	—	4,1	1,6	99-109	—	2,3	0,8	
200-220		—	3,6	1,3	109-115	—	2,4	0,7		
304-315		—	2,4	1,0	115-125	—	2,6	0,4		
365-370		—	2,2	1,0	125-135	—	1,8	0,6		
400-420		—	2,8	0,8	135-140	—	1,6	0,5		
530-535		—	4,2	2,1	Moyenne (vase)		2,2	0,75		

TABLE IV.— Teneur en uranium des sédiments de la plaine abyssale.

Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)
14	14-16	Vase	1,6	1,2
	16-24		1,5	0,9
	18-21		1,9	0,6
	24-32		2,3	1,0
	32-34		1,9	0,7
	34-40		2,5	0,5
	40-43		2,5	0,6
	43-53		2,7	0,8
	59-63		2,1	0,5
	63-75		1,7	0,4
	75-78		2,5	0,8
	78-84		1,9	0,4
	84-87		2,0	0,7
	87-97		1,8	0,4
	97-107		2,2	0,8
	107-110		2,5	0,9
	110-128		2,0	0,7
	128-131		2,5	0,7
	131-132		2,6	0,6
	132-135		2,4	0,6
	135-138		2,6	0,7
	138-140		2,5	1,2
	140-156		3,0	1,8
	156-160		2,7	1,2
	160-172		3,0	1,0
	172-174		2,2	0,7
	174-178		2,4	0,6
	180-182		1,4	0,6
	182-200		2,1	0,6
	200-202		1,8	0,8
	202-220		1,8	0,6
	220-222		1,9	0,8
	222-237		1,7	0,7
	237-240		1,8	1,0
	240-260		1,8	0,9
	260-262		1,9	0,8
	262-273		2,0	0,8
	273-275		1,7	1,1
	275-285		2,1	1,2
	285-305		2,2	1,7
305-310	2,8	1,0		
310-321	2,9	0,8		
321-341	1,9	0,6		
341-346	1,4	0,6		
346-366	1,5	0,6		
366-371	1,4	0,6		
371-391	1,7	0,7		
391-396	1,6	0,5		
396-416	1,6	0,5		
416-421	1,2	0,4		
421-438	1,7	0,7		
448-456	3,5	2,6		
456-459	2,9	2,0		
468-471	2,7	1,6		
471-473	2,6	1,0		
473-490	2,0	0,8		
Moyenne (vase)			2,1	0,8

Déviati on standard $\sigma = \pm 0,5 = 23 \%$

TABLE IV. — (Suite).

Carotte	Profondeur dans la carotte (en cm)	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)
11 Ajaccio	0-15	Sable fin Vase	2,8	2,4
	15-20		5,7	4,2
	20-30		5,5	4,0
	30-32		4,7	4,1
	32-42		4,0	2,8
	42-44		5,4	3,6
	44-54		4,2	3,0
	54-56		4,5	2,9
	56-66		3,7	2,8
	66-68		4,5	3,1
	68-78		3,1	2,4
	78-80		3,8	2,4
	80-90		3,7	2,7
	90-92		3,5	2,8
	92-102		5,2	3,2
	102-130		3,6	2,8
	130-140		5,3	2,5
	140-170	5,3	2,6	
	170-180	4,3	2,8	
	180-200	Sable	2,9	2,4
	200-210		2,7	2,7
	260-270		1,9	1,9
	270-280		2,3	1,9
	280-290		1,8	1,2
	290-300		1,5	1,1
	300-310		1,4	1,2
	310-320		1,5	1,1
	320-340		1,6	1,4
	340-350		1,1	1,1
	350-370		1,5	1,2
	370-380		1,8	1,4
	380-400		1,8	1,5
	400-410		1,3	1,1
410-430	1,2		1,5	
445-455	Sable fin Vase		2,4	2,0
455-465		4,4	2,4	
465-480		5,2	3,0	
480-492		3,8	2,5	
492-499		4,0	2,6	
499-517		4,6	2,8	
Moyenne (Vase)			4,4	2,9
Moyenne (sable)		1,5	1,2	
93 Villefranche	Surface	Vase	3,2	1,1
94 Villefranche	Surface	Vase	3,1	0,8
97 Villefranche	Surface	Vase	2,4	0,6
150 Villefranche	Surface	Vase	2,4	0,8
151 Villefranche	Surface	Vase noire	6,0	—

TABLE V. — Teneur en uranium des sédiments de la baie d'Ajaccio et de la baie de Villefranche-sur-Mer.

3^o) *Plaine abyssale* (tabl. IV).

Nous avons fait, à bord du N.O. « Calypso », un groupe de huit carottages dans la plaine abyssale à plus de 2 500 m de profondeur. La teneur moyenne en uranium total pour les 150 échantillons de vase analysés est de 2,5 ppm et celle de l'uranium soluble de 0,9 ppm soit 36 % de l'uranium total.

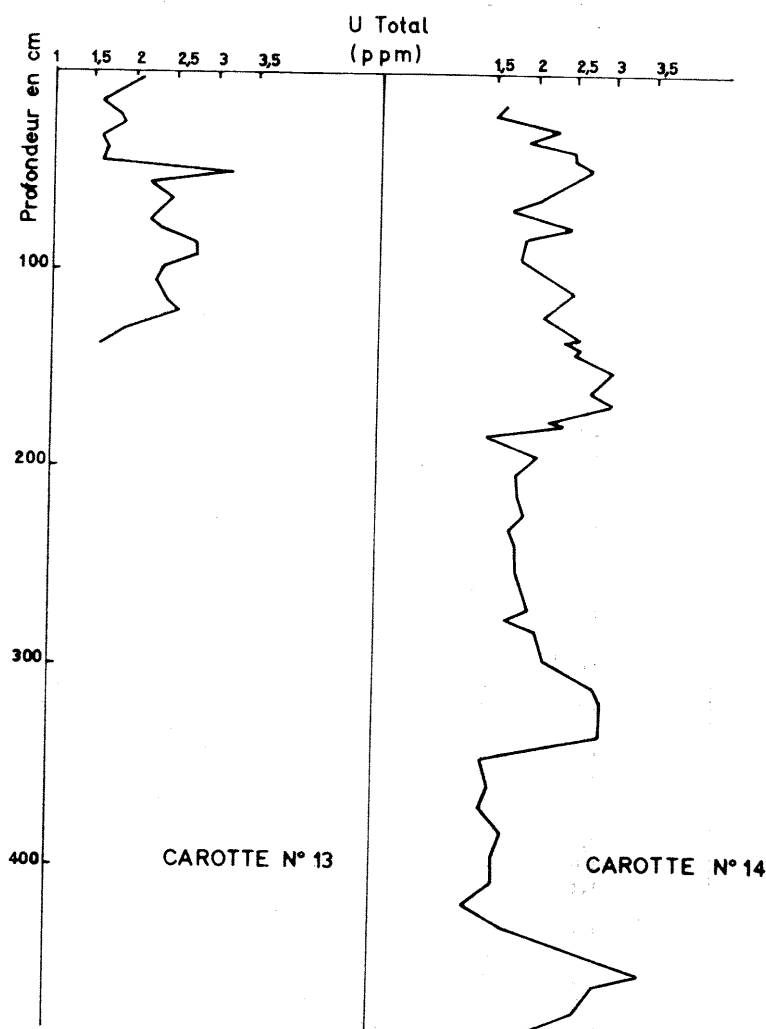


FIG. 2. Courbes de répartition de l'uranium en fonction de la profondeur dans le sédiment dans les carottes C₁₃ et C₁₄.

Répartition de l'uranium en fonction de la profondeur.

La figure 2 donne la courbe de répartition de l'uranium total en fonction de la profondeur pour les carottes C₁₃ et C₁₄. On n'observe pas de maximum prononcé ce qui prouverait que l'uranium se trouve dispersé dans la masse du sédiment. La teneur en uranium total n'a pas subi de fortes variations pendant la période de temps représentée par la colonne sédimentaire. Dans la carotte 14, la courbe présente trois zones différentes, de 0 à 180 cm, de 180 à 300 cm et de 340 à 420 cm. Une étude est actuellement en cours pour tenter d'expliquer ces trois zones qui semblent être dues à des différences de température. La déviation standard σ pour la carotte 13 est de $\pm 0,45$ soit 20 % et pour la carotte 14 $\sigma \pm 0,5$ soit 23 %.

4°) *Baie d'Ajaccio* (tabl. V).

Nous avons prélevé à bord de la « Calypso » une carotte par 670 m à la sortie de la baie d'Ajaccio. La carotte est composée de lits de vase et de lits de sable. Nous avons fait 23 analyses de la vase, 6 du sable fin et 11 d'un lit de sable granoclassé de 165 cm de longueur.

La teneur moyenne en uranium total de la vase est de 4,4 ppm, les valeurs extrêmes étant de 3,7 et 5,7 ppm, ce sont les valeurs les plus élevées que l'on a trouvées en Méditerranée, exception faite d'un échantillon de vase noire très réductrice du fond de la rade de Villefranche-sur-mer dont nous reparlerons plus loin. La teneur en uranium soluble est en moyenne de 2,9 ppm, soit 65 % de l'uranium total.

Le lit de sable granoclassé a une teneur moyenne en uranium total de 1,5 ppm, et une teneur en uranium soluble de 1,2 ppm, soit 80 % de l'uranium total.

5°) *Baie de Villefranche-sur-Mer* (tabl. V).

Nous avons prélevé 4 échantillons au milieu de la baie et 1 dans une cuvette remplie de vase noire très réductrice et située au fond de la baie. La teneur moyenne pour les quatre premiers échantillons est de 2,7 ppm d'uranium total et 0,8 ppm d'uranium soluble soit un rapport de 29 %. Celle de la cuvette réductrice est de 6 ppm d'uranium total, ce qui est la plus forte valeur trouvée en Méditerranée, ceci s'explique par la présence d'ions S⁻ qui réduisent l'uranium de l'eau et le précipitent.

Échantillon	Profondeur dans le sédiment	Nature de l'échantillon	Uranium total (ppm)	Uranium soluble (ppm)		
54	Surface	Sable grossier	0,7	0,1		
55			0,6	0,2		
56			0,8	0,5		
57			0,6	0,5		
58			0,7	0,4		
60			0,6	0,3		
62			0,6	0,3		
63			0,6	0,3		
65			0,9	0,4		
B 3 D			0,6	0,3		
Moyenne					0,6	0,3

TABL. VI. — Teneur en uranium des sédiments de la Manche.

6°) *Comparaison avec la Manche* (tabl. VI).

Nous avons analysé 10 échantillons de sédiment de surface prélevés dans la Manche par le N.O. « Thalassa ». Ces sédiments sont des sables coquilliers grossiers. Nous avons dosé l'uranium sur la fraction inférieure à 4 mm. La teneur moyenne en uranium total est de 0,6 ppm, la teneur moyenne en uranium soluble est de 0,3 ppm, soit un rapport de 50 %.

La teneur en uranium est donc quatre fois inférieure à celle de la Méditerranée.

Conclusions.

La valeur moyenne de la teneur en uranium total pour les sédiments du bassin occidental de la Méditerranée est de 2,3 ppm, semblable à celle de l'Atlantique (KRÖLL 1955). L'uranium soluble représente 60 % de l'uranium total dans les régions côtières (Baléares et plateau continental français) et 36 % de l'uranium total dans la plaine abyssale. Pour la plaine abyssale ce

rapport est en accord avec la valeur donnée par ADAMS *et al.* (1959). La valeur élevée du rapport uranium soluble/uranium total dans les sédiments du plateau continental indique une précipitation plus importante de l'uranium soluble dans les régions côtières en raison de la plus forte teneur en particules en suspension de ces eaux.

Remerciements.

Nous remercions M. PELUCHON, Ingénieur hydrographe principal de nous avoir fourni une série importante d'échantillons prélevés par le N.O. « Origny » ainsi que R. CHESSELET et D. NORDEMANN qui nous ont donné les échantillons prélevés en Manche par le N.O. « Thalassa ». Nos remerciements vont aussi à M. le Professeur J. BOURCART qui a bien voulu nous permettre d'embarquer sur le N.O. « Calypso » au cours de sa mission de juillet 1961 en Méditerranée occidentale.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS (J.), OSMOND (J.) et ROGERS (J.), 1959. — The Geochemistry of thorium and uranium. — *In Physics and Chemistry of the Earth*, 3, Pergamon Press, p. 298.
- ADAMS (J.) et WEAVER (C.), 1958. — Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes; an exemple of geochemical facies. — *Amer. Assoc. Petr. Geol.*, 42, p. 387-430.
- ARRHENIUS (G.), BRAMLETTE (M.) et PICCIOTTO (E.), 1957. — Localisation of radioactive and stable heavy nuclides in ocean sediments. — *Nature London*, 180, p. 85-86.
- BARANOV (V.) et KUZMINA (L.), 1958. — Radiochemical analysis of deep sea sediments Proc. of the first UNESCO. — *Int. Conf. on radioisotopes. in scientif. res.* (Ed. EXTERMENN) 2, p. 619.
- BOWIE (S.) et ALKIN (D.), 1956. — An unusually radioactive fossile fish from Thurso Scotland. — *Nature London*, 177, p. 487-488.
- BREGER (I.) et DEUL (M.), 1956. — The organic geochemistry of Uranium. — *U.S. Geol. Surv. Prof Paper* 300, p. 505.
- FREDERICKSON (A.F.), 1948. — Some mechanisms for the fixation of uranium in certain sediments *Science* 108, p. 184-185.
- GOLDBERG (E.) et KOIDE (M.), 1958. — Ionium Thorium chronology in deep sea sediments of the Pacifique. — *Science*, 218, p. 1003.
- 1961. — Geochronological studies of deep sea sediments by the ionium/thorium method. — *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 26, p. 417.
- HERNEGGER (F.), 1933. — Methoden für einem emprindlichen Urannachweis in Quell sedimenten. — *Anz. Wiener Acad. d. Wiss. Math. Naturw. Kl.* 2 15 vom. 19 : *Mitt. Inst. Radiumforsch. Wien*, 301 a.
- HERNEGGER (F.) et KARLIK (B.), 1935. — Uranium in sea water. — *Göteborgs Kgl. Vetenskaps. Vitterhets. Samball Handl.*, ser. B4, n° 12.
- KROLL (V.), 1955. — The distribution of radium in deep sea cores. — *Repts of the Swedish deep sea Exp.*, 10.
- McKELVEY (V.E.) et NELSON (J.M.), 1950. — Characteristics of marine uranium-bearing sedimentary rocks. — *Econ. Geol.*, 45, p. 35-53.
- PICCIOTTO (E.) et WILGAIN (S.), 1954. — Thorium determination in deep sea sediments. — *Nature London*, 173, p. 632.
- ROSHOLT (J.), EMILIANI (C.), GEISS (J.), KOCZY (F.) et WANGERSKY (P.), 1961. — Absolute dating of deep sea cores by the Pa²³¹/Th²³⁰ method. — *J. Geol.*, 69, p. 162.
- ROUBAULT (M.), 1958. — Géologie de l'uranium. — MASSON, Edit., Paris.
- URRY (W.), 1941. — The radioactive determination of small amounts of uranium. — *Am. J. Sci.*, 239, p. 191.