

J.-M. MARTIN *

UTILISATION DES RADIOÉLÉMENTS NATURELS EN SÉDIMENTOLOGIE

1. — Introduction

Au lieu d'injecter dans le milieu naturel des traceurs radioactifs artificiels il est possible d'utiliser les radio-nuclides naturels présents dans les sédiments et les radio-nuclides artificiels ayant pour origine les retombées radioactives issues des explosions atmosphériques ainsi que les rejets effectués par les centrales nucléaires.

Cette méthode a surtout été développée ces dernières années grâce aux progrès des techniques radiométriques (compteurs à scintillation en particulier) tant sur le terrain qu'au laboratoire.

Alors que de nombreux sédimentologues s'intéressent à ses applications, il nous a paru utile, après avoir examiné les principales sources de radioactivité rencontrées dans la nature, d'entreprendre l'étude critique et systématique de cette méthode afin d'en préciser les limites. Nous donnerons enfin un certain nombre d'exemples où elle a permis d'obtenir des résultats intéressants.

2. — Les sources de radioactivité

2.1 Radioactivité naturelle.

A partir de $Z = 80$ la plupart des éléments rencontrés dans la nature sont radioactifs. La grande majorité des photons γ sont émis par les familles de l'uranium 238 et du thorium 232.

Seuls quelques éléments d'un $Z < 80$, dont le principal est le potassium 40, sont également radioactifs.

En terme d'activité on peut calculer qu'à des teneurs

de 1 ppm de ^{238}U et 1 ppm de ^{232}Th correspondent respectivement, pour l'ensemble des émetteurs de chacune de ces familles supposées à l'équilibre, des activités de 1,46 et 0,57 pCi/g . De même à 1 % de K correspond une activité de 1 pCi/g [1].

Prenons l'exemple d'un sable de plage moyennement radioactif contenant 10 ppm de ^{232}Th , 3 ppm de ^{238}U et 1 % de ^{40}K , son activité sera d'environ 10 pCi/g . On est donc en présence d'activités extrêmement faibles dont la mesure nécessitera l'emploi de détecteurs très sensibles; sur ces 10 pCi/g un seulement est redevable au ^{40}K . On voit donc que la contribution de ce dernier émetteur sera très faible. De plus le potassium est contenu dans des minéraux très altérables (feldspaths alcalins et feldspathoïdes) ou à comportement hydraulique particulier (micas).

On sait d'autre part que l'uranium U^{4+} a la propriété de former en milieu oxydant des ions uranyles solubles [2].

Ces diverses raisons nous ont amené, ainsi que divers chercheurs, à choisir le thorium comme traceur naturel.

LES MINÉRAUX RADIOACTIFS.

Il est bien connu que l'uranium et le thorium sont généralement concentrés dans les dernières phases de cristallisation et se retrouvent dans les minéraux accessoires comme le zircon, le sphène, l'allanite, l'ilménite, l'apatite, le xénotime, la monazite, etc. On notera ici que ces trois derniers peuvent être facilement détruits par l'action des vagues [3].

Le tableau 1 donne les teneurs en uranium et thorium de quelques minéraux des roches éruptives.

Nous donnons tableau 2 les teneurs en uranium et thorium dans des zircons, monazites et ilménites triés à partir de sédiments sableux.

* Attaché de Recherches au CNRS. Laboratoire de Géologie Dynamique, 9, quai Saint-Bernard, Paris (5^e).

Tableau 1

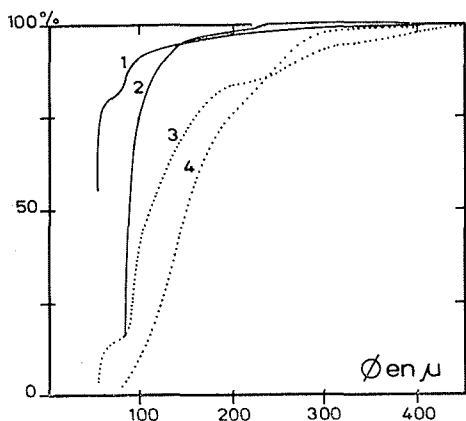
Teneurs en thorium et uranium des principaux minéraux radioactifs d'après J.-W. Frondel et M. Fleischer [4] et P.-M. Hurley et H.-W. Fairbairn [5]

MINÉRAL	Th en %	U en %
Allanite [4].....	3,2	0,2
Apatite [5].....	0,007	0,007
Xenotime [4].....	2,2	3,6
Sphène [5].....	0,051	0,28
Epidote [5].....	0,021	0,043
Thorite [4].....	25-63	jusqu'à 9
Euxenite [4].....	jusqu'à 4,3	3,9
Monazite [4].....	4,97	0,22
Monazite [5].....	10	—
Zircon [4].....	13,1	13,1
Zircon [5].....	0,057	0,133

Tableau 2

Teneurs en thorium et en uranium de quelques minéraux des sables (J.-M. Martin, 1968)

MINÉRAL	ORIGINE	Th en %	U en %
ZIRCON	Idaho (U.S.A.)....	$39,5 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
	Australie.	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$
	Sénégal.	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	Sulba (Brésil).	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
	Travancore (Inde).	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$
ILMENITE	Sulba (Brésil).	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-2}$
MONAZITE	Travancore (Inde).	5,08	—
	Fort Dauphin (Madagascar).	6,53	—
	Caroline du Sud (U.S.A.).	3,01	—
	Sulba (Brésil).	3,38	—
	Ceylan.	6,08	—



1/ Courbes cumulées des masses et teneurs en thorium. 1 et 2 : thorium (1 : Fréjus; 2 : Soulac); 3 et 4 : granulométrie (3 : Fréjus; 4 : Soulac).

2.2 Radioactivité artificielle.

EXPLOSIONS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

Les tests nucléaires atmosphériques classiques et thermonucléaires ont injecté, sous forme d'aérosols, de grandes quantités de produits de fission dans les différentes couches de l'atmosphère puis sur la terre elle-même.

Les principaux émetteurs γ dont la période est suffisamment longue pour leur permettre de subsister sont les suivants : $^{141}\text{(Ce, Pr)}$, $^{144}\text{(Ce, Pr)}$, $^{103}\text{(Ru, Rh)}$, $^{106}\text{(Ru, Rh)}$, $^{95}\text{(Zr, Nb)}$, (^{137}Cs , $^{137\text{m}}\text{Ba}$)...

Ces différents éléments peuvent être adsorbés par les particules sédimentaires, argileuses notamment, qui se trouvent ainsi marquées. Cependant, en raison de l'arrêt des grandes explosions nucléaires soviétiques et américaines à partir de 1962, seul le ^{137}Cs , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (T = 30 ans) se retrouve aujourd'hui à un niveau d'activité suffisant pour lui permettre d'être utilisé facilement comme traceur en sédimentologie.

LES REJETS.

Les effluents liquides rejetés par les centres et usines nucléaires ont une composition radiochimique très variée. Il est toutefois possible de les classer en deux grandes catégories [6].

a) Effluents contenant surtout des produits de fission et peu de produits radio-induits. C'est le cas de Marcoule et d'Oakridge qui rejettent respectivement dans le Rhône et la Clinch River. Les principaux radionuclides sont $^{103}\text{(Ru, Rh)}$, $^{106}\text{(Ru, Rh)}$ et en quantité moindre $^{95}\text{(Zr, Nb)}$.

b) Effluents contenant beaucoup d'éléments radio-induits et peu de produits de fission; c'est notamment le cas de Hanford qui rejette dans la Columbia River. D'après Foster [9] 90 % de la radioactivité serait imputable aux radioéléments suivants : ^{51}Cr , ^{64}Cu , ^{24}Na , ^{239}Np , ^{31}Si , ^{56}Mn , ^{76}As .

3. — Répartition des radioéléments dans les minéraux et les roches

3.1 Remarque préliminaire.

L'étude du comportement chimique des radionuclides cités précédemment lors de leur transport en milieu liquide est extrêmement complexe et ne sera pas abordée ici. Nous nous limiterons à l'étude de la loi de répartition du thorium en fonction de la granulométrie et de la concentration en minéraux lourds.

3.2 Radioactivité des sables.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Nous avons analysé, par spectrométrie γ à haute sensibilité, les radionuclides présents dans les diverses fractions granulométriques d'échantillons de sables fins littoraux.

Nos études ont porté principalement sur des échantillons prélevés sur les plages de Soulac, sur la côte Atlantique, l'Espiguette, Fréjus et La Napoule (sur la côte Méditerranéenne).

L'établissement des courbes des masses et des activités cumulées montre que dans tous les cas la quasi-totalité des radionuclides émetteurs γ se trouve dans la fraction inférieure à 100 μ .

Dans l'échantillon prélevé en haute plage à Soulac, 75 % de l'activité en thorium est contenue dans cette fraction, ce pourcentage atteignant 90 % pour l'échantillon de Fréjus, alors que les masses correspondantes ne représentent que 11,5 et 40,4 % du poids total (fig. 1). Pour le radium et le potassium on obtient des pourcentages d'activité sensiblement inférieurs.

Il nous a en outre paru utile de déterminer la forme de la courbe reliant l'activité spécifique à la taille des particules. Nous avons trouvé, en moyenne, pour ces échantillons $Th = kD^{-4,5}$ où Th est exprimé en nano Ci/kg et D en μ (fig. 2). La valeur absolue de l'exposant semble assez constante pour la fraction fine des sables alors qu'elle peut décroître dans la fraction plus grossière. Notons dès maintenant qu'une telle loi de « marquage » interdit toute exploitation quantitative des données fournies par les traceurs naturels (pour le radium et le potassium cet exposant serait sensiblement inférieur). Nous reviendrons sur les conséquences d'une telle répartition du point de vue de l'interprétation qualitative.

En ce qui concerne l'activité en thorium dans les diverses fractions granulométriques de minéraux lourds, dont le rôle dans la concentration des éléments radioactifs est bien connue [4] [5] [10], nous donnons à titre d'exemple la courbe obtenue pour un sable de Fréjus, on a $Th = kD^{-2,2}$ (fig. 2).

Si l'on compare le pourcentage de thorium contenu dans la fraction lourde par rapport à celui contenu dans la fraction légère, en fonction de la taille des grains on remarque (fig. 3) que presque tout le thorium est contenu dans la fraction lourde en dessous de 100 μ , au contraire, au-dessous de 200 μ , la fraction légère contient plus de 90 % du thorium en raison de la diminution de la quantité de minéraux lourds dans les fractions grossières. Cependant l'activité spécifique de la fraction légère est très faible.

Au sein d'une même espèce minérale et pour une origine donnée, l'activité peut varier avec la taille du cristal sans que l'on puisse actuellement établir une loi générale. Si nous n'avons pas trouvé de variations dans les cristaux de monazite (fig. 4) les zircons voient leur concentration en thorium augmenter avec le diamètre des grains, le radium pouvant d'ailleurs varier de façon inverse. Pour l'ilménite nous avons trouvé une augmentation de la teneur en thorium avec la diminution de la granulométrie. X.M. de Morais trouve une variation similaire pour certains sphènes [11]; il a également montré que les radionuclides étaient concentrés dans les zones les plus externes des cristaux d'allanite [12].

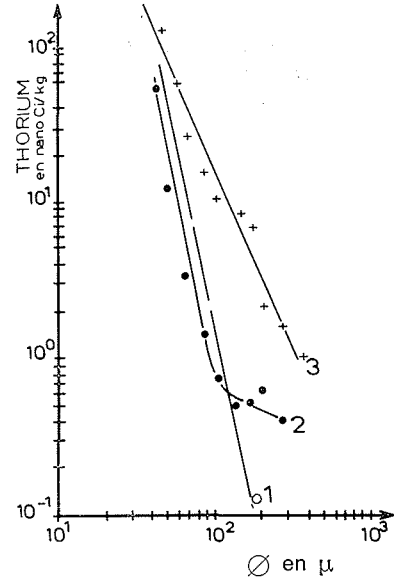
Enfin la radioactivité d'un minéral peut varier selon son origine. P.C. Ragland [13] croit pouvoir classer les zircons en deux familles selon qu'ils dérivent de roches granitiques ou volcaniques (fig. 5); cette propriété pouvant d'ailleurs permettre de préciser l'origine de certains sables.

CONSÉQUENCES.

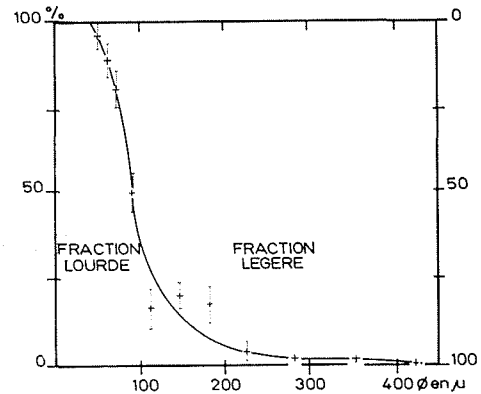
Ces premiers résultats montrent que l'utilisation des traceurs naturels, pour étudier du seul point de vue qualitatif le transit des sables, appelle un certain nombre de réserves et que l'interprétation des résultats exige un minimum de précautions.

a) Le fait que l'activité soit liée en grande partie aux minéraux lourds montre que le traceur choisi ne se déplace pas exactement de la même façon que l'ensemble du sédiment étudié.

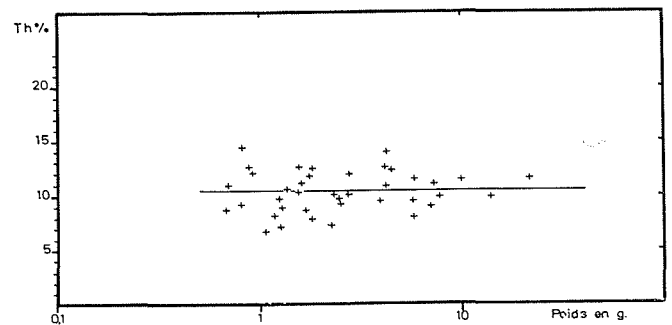
b) La plus grande partie des éléments actifs se trouve concentrée dans la fraction granulométrique inférieure à 100 μ , c'est-à-dire dans le sablon qui n'est pas toujours représentatif de l'échantillon global; par contre, ce fait de-



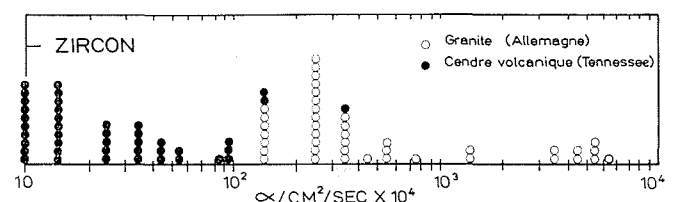
2/ Relation entre l'activité spécifique et la taille des particules. 1 et 2: Echantillon global (1: Soulac; 2: Fréjus). 3: Fraction lourde (Fréjus).



3/ Pourcentage de thorium contenu dans la fraction lourde en fonction de la taille des grains (Fréjus).



4/ Relation entre la teneur en thorium et la taille des cristaux de monazite (Madagascar).



5/ Histogramme de l'activité alpha dans des zircons de différentes origines (d'après P.C. Ragland).

vient intéressant lorsque c'est précisément cette fraction qui subit le transport de masse le plus important.

c) On devra donc vérifier que les variations de la radioactivité naturelle ne sont pas liées à la concentration d'une classe granulométrique à la faveur d'ondulations du fond marin ou du profil topographique de la plage.

Nous donnons à titre d'exemple (fig. 6) l'activité spécifique moyenne du thorium déterminée par spectrométrie γ , de 96 échantillons prélevés sur 10 profils de plage des Landes.

En moyenne, les valeurs minimales se rencontrent dans la zone intercotidale alors que le maximum d'activité se situe en haute plage et en front de plage; ces zones sont en effet le siège d'un important triage par le vent qui sépare des minéraux lourds les grains de sable plus légers. Cette répartition montre que du point de vue des prélèvements à effectuer, il est nécessaire de toujours choisir la même zone repère pour toute étude se proposant de définir des déplacements longitudinaux.

De plus, la concentration en thorium peut subir des variations saisonnières importantes ainsi que le montre la figure 7 établie par A.M. Kamel [14] pour une plage de San Francisco.

d) Toute recherche ayant pour but de déterminer l'origine d'un sédiment d'après sa radioactivité devra être effectuée sur la même fraction granulométrique.

3.3 Autres sédiments.

Il existe un très grand nombre de données dont la plus grande part provient des analyses effectuées par les pétroliers. On trouve en moyenne les valeurs les plus élevées dans les roches résiduelles (bauxites et bentonites) [10].

Dans les schistes les teneurs sont d'environ 8-15 ppm de thorium et 2-4 ppm d'uranium. Les concentrations les plus basses se rencontrent dans les roches formées par précipitation (calcaire, anhydrite, halite, chert) avec des teneurs voisines du ppm tant pour l'uranium que le thorium.

4. — Les applications

Nous ne reviendrons pas sur l'application des mesures de radioactivité naturelle à la détermination de la turbidité qui a été décrite dans le précédent exposé.

4.1 Origine et dynamique des sédiments.

Compte tenu des remarques effectuées ci-dessus (3.3) il est possible de déterminer l'origine et le sens de déplacement des sédiments dès qu'il existe une source suffisamment active.

A notre connaissance les résultats les plus démonstratifs ont été obtenus par A.M. Kamel [14] et J.R. Byerly [15] [16].

La figure 8 extraite de Kamel, donne les variations en thorium en relation avec les courants littoraux pour une zone située près de San Francisco.

Nous avons tenté d'appliquer cette méthode sur la côte des Landes (fig. 9). Les mesures de radioactivité effectuées sur l'échantillon global mettent en évidence une décroissance des teneurs en thorium du nord vers le sud qui peut s'expliquer par la dispersion vers le sud des minéraux actifs (ilménite en particulier) dont on rencontre actuellement les plus fortes concentrations dans la région de Soulac-L'Amélie.

Il faut toutefois rappeler que le traceur est localisé dans les minéraux lourds et dans la fraction inférieure à 100 μ

et qu'il n'est donc pas représentatif de l'ensemble du sédiment étudié. Nous avons d'ailleurs effectué les mêmes mesures sur la fraction 250-315 μ qui encadre généralement la médiane granulométrique de ces sables et aucune variation significative n'a pu être mise en évidence.

Si le déplacement d'ensemble des sables du nord vers le sud a pu être confirmé par des méthodes différentes il demeure que la mauvaise similitude entre le « traceur » et le sédiment global ne permet pas d'obtenir des résultats à caractère exhaustifs et qu'en l'absence de recoupement avec d'autres méthodes on ne pourrait exclure la possibilité certes improbable d'un mouvement du traceur en sens inverse du reste du sédiment.

Dans une étude de la radioactivité des sables (fraction 250-315 μ) de la Garonne, de la Dordogne et de l'estuaire de la Gironde (fig. 10), nous avons pu mettre en évidence une décroissance exponentielle régulière en thorium à partir de l'amont jusqu'à environ 30 km en aval de Bordeaux qui confirme l'origine fluviale des sables de la Gironde; on assiste toutefois à une remontée notable entre les PK* 60 et 80 qui doit correspondre à un triage et à une concentration secondaire des minéraux lourds.

Rappelons également les mesures de bruit de fond γ effectuées dans les baies de Fréjus et à La Napoule qui ont permis [18, 19] de mettre en évidence des taches radioactives bien individualisées dont l'évolution peut donner une idée du transit sédimentaire de l'est vers l'ouest.

Signalons pour terminer les études que nous avons effectuées, en collaboration avec le Laboratoire Central d'Hydraulique de France sur l'estuaire du Mahury (Guyane) qui permettent de confirmer l'origine des sédiments pélagiques apportés dans l'estuaire dont la plus grande part proviendrait de l'Amazone alors que les éléments plus grossiers auraient une origine essentiellement locale.

4.2 Cas de la Columbia River.

Les sédiments situés sur le plateau continental au large de la Columbia River sont marqués par les radionuclides contenus dans les effluents du réacteur de Hanford; ceux-ci (^{65}Zn , ^{60}Co ...) associés pour la plus grande part à de la matière terrigène apportée par la Columbia River, sont incorporés aux sédiments du plateau continental. L'étude de la répartition et de la variation de l'activité en ^{65}Zn et ^{60}Co a permis à G. Gross [20, 21] de mettre en évidence un transit vers le nord de 12 à 30 km/an et vers le large de 2,5 à 10 km/an.

4.3 Application à la cartographie.

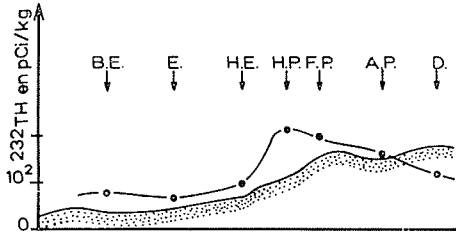
En se fondant sur la différence entre les bruits de fond radioactifs naturels enregistrés sur des fonds sableux ou argileux, Bastin [22, 23, 24] a pu dresser la carte lithologique de la mer du Nord en face de la côte belge d'une part, de l'Escaut à Anvers d'autre part (fig. 11). Il faut insister sur le fait que les 2 500 km² de la carte de la mer du Nord ont été levés en quinze jours environ.

Signalons également les études effectuées par E.F. Alekseev, A.N. Chatzov et R.P. Gottich [25] sur la sédimentation actuelle dans la baie de Kourinsky et la mer Karadog.

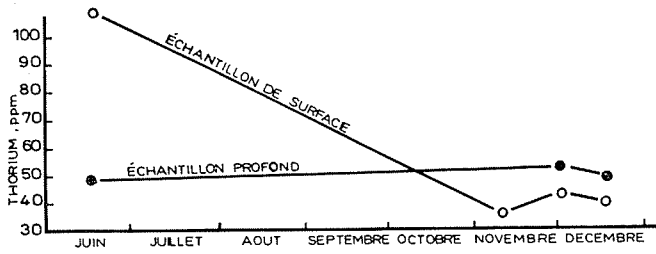
4.4 Utilisation de la radioactivité naturelle dans les forages [26]

La radioactivité des formations sédimentaires traversées lors des forages peut être enregistrée en descendant un

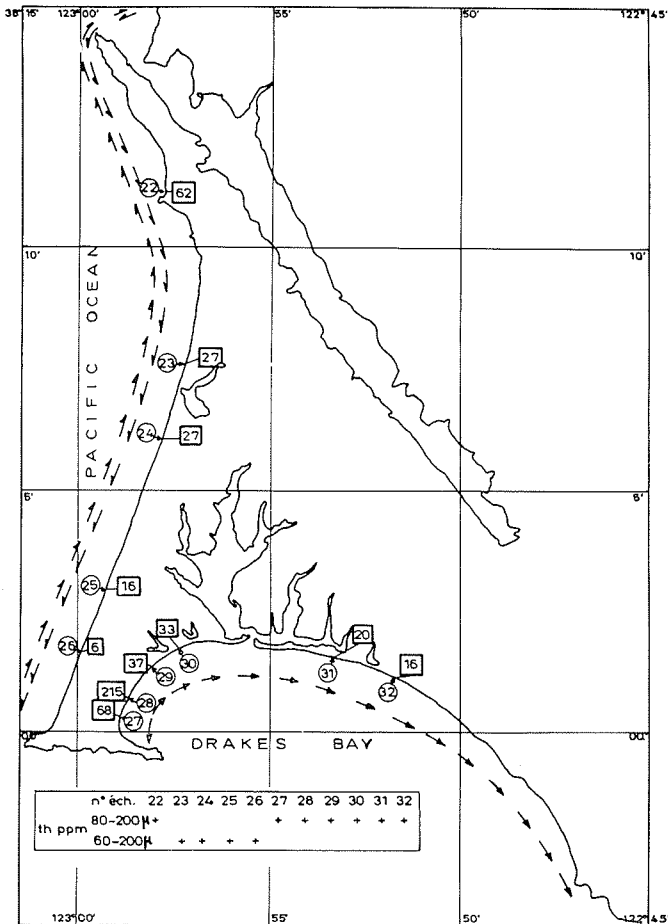
(*) Distance de Bordeaux en km.



6/ Variations moyennes de l'activité spécifique du thorium sur les plages des Landes de Gascogne. Profil type B.E.: bas estran; E.: estran; H.E.: haut estran; H.P.: haute plage; F.P.: front de plage; A.P.: arrière plage; D: dune.

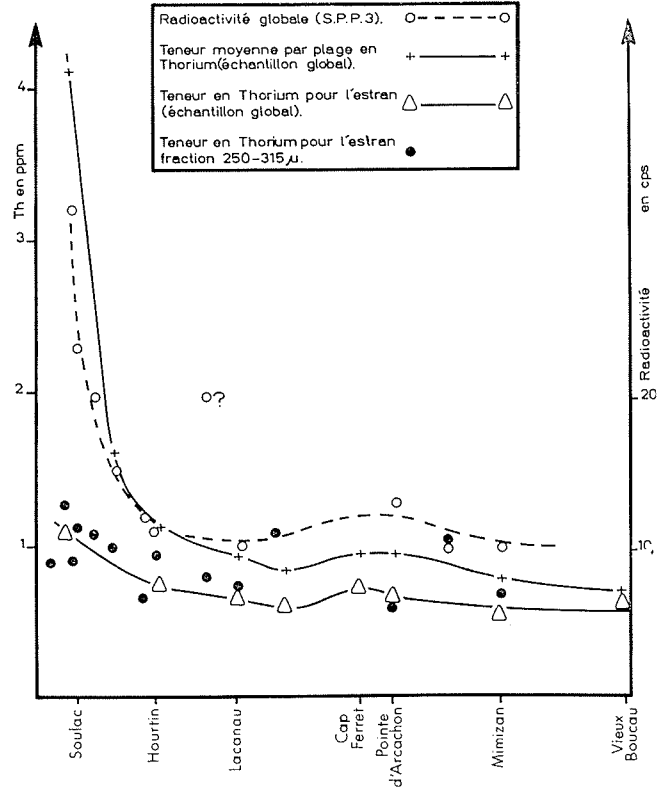


7/ Variation saisonnière de la concentration en thorium sur une plage de San Francisco (d'après A.M. Kamel).

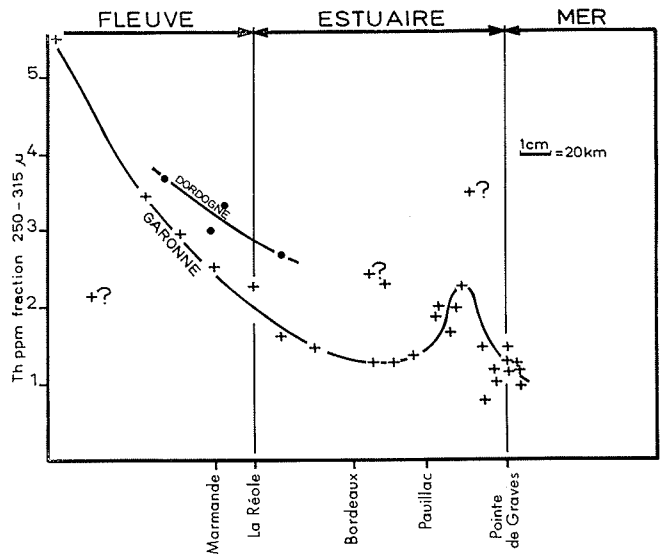


8/ Variation de la teneur en thorium en fonction des courants littoraux (zone voisine de San Francisco) (d'après A.M. Kamel).

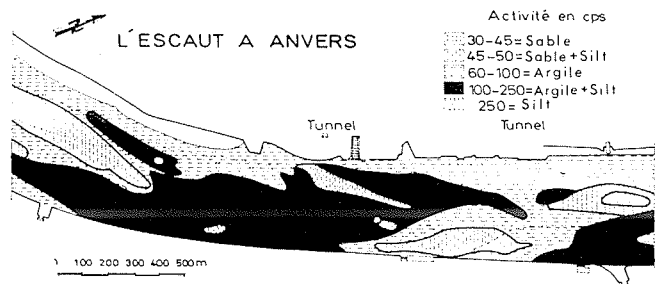
Carte lithologique de l'Escaut à Anvers dressée à partir de // 11 mesures de radioactivité naturelle (d'après A. Bastin).

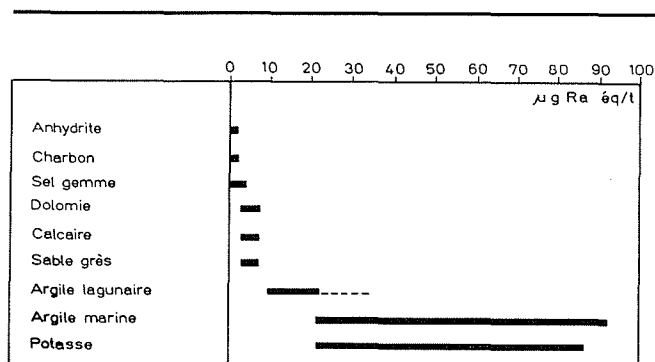


9/ Variation en thorium sur le littoral des Landes.



10/ Variation en thorium dans la Garonne, la Dordogne et l'estuaire de la Gironde.





12/ Intensité du rayonnement gamma en fonction de la nature des roches sédimentaires (d'après S. J. Pirson).

détecteur à scintillation dans le trou de forage, on établit ainsi un diagramme de rayonnement γ (ou « log de γ ray »).

Les résultats bruts enregistrés doivent évidemment être corrigés d'un certain nombre de facteurs dépendant notamment de la radioactivité de la boue, du diamètre du sondage et de l'existence d'un tubage. L'intensité corrigée du rayonnement dépend alors de la nature de la roche traversée (fig. 12) et [27]; le log permettra donc de reconstituer la coupe lithologique du sondage.

Cette technique est surtout employée dans les sondages pétroliers pour détecter les zones argileuses, généralement plus radioactives que les sables (fig. 13) [28]. Elle se révèle particulièrement utile lorsque la PS* est peu interprétable (cas des boues salées) ou impossible à enregistrer (cas de boues non conductrices, trou tubé).

Il est parfois possible, dans le cas de certains sables à lamination d'argile d'estimer le pourcentage d'argile à partir du « log de γ ray », et d'établir une relation empirique entre la porosité et la radioactivité; ce type de relation ne pourra évidemment être appliqué que *localement*.

« Cette diagraphie sert aussi en tubage sur les puits anciens ou pour raccorder les diagraphies en trou ouvert et les joints de tubage au point de vue de la profondeur. On peut ainsi perforer avec une grande précision si ceux-ci sont repérés par rapport aux diagraphies faites en trou ouvert » [29].

Notons enfin que les diagraphies de rayonnement γ sont utilisées pour détecter et évaluer les teneurs en potasse, dont l'activité redevable au ^{40}K est très élevée, et, à l'opposé pour mettre en évidence les formations très peu radioactives comme les couches de charbon.

4.5 Utilisation des retombées radioactives pour déterminer la vitesse de sédimentation.

L'étude de la distribution verticale des concentrations en radionuclides artificielle issus des tests nucléaires, dans les carottes, comparée aux activités mesurées dans les retombées atmosphériques peut permettre de préciser certains processus de sédimentation actuelle. Cette méthode a surtout été développée par Cerrai, Schreiber et al. [30, 31].

Il est important de choisir des carottes dont la teneur en argiles (donc la capacité d'échange cationique) est sensiblement uniforme. Compte tenu de cette précaution Schreiber et al ont pu évaluer à 2 cm/an la vitesse de

sédimentation dans le delta du Pô, et à 1,5 cm/an celle existant sur le plateau continental de la mer Ligure.

Nous avons, quant à nous, déterminé un taux de sédimentation dans la plaine centrale du lac Léman, égal à $0,4 \pm 0,2$ cm/an.

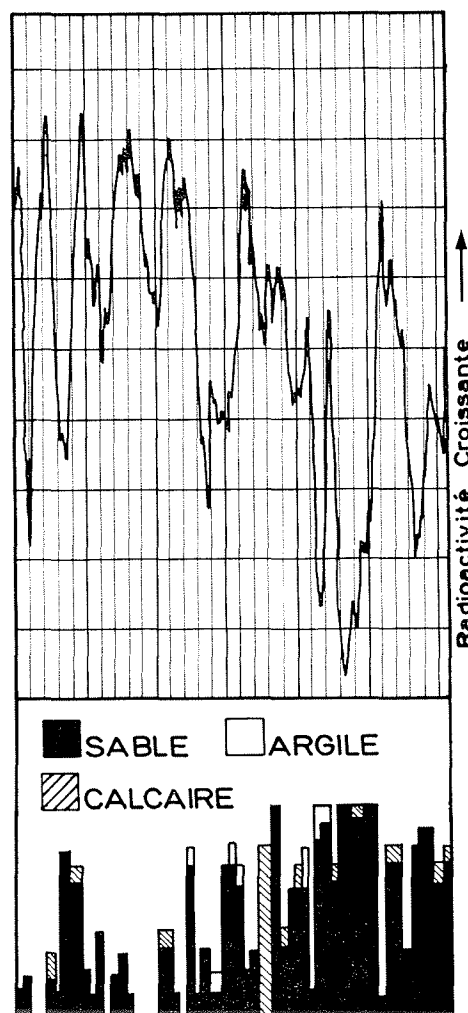
Il est, de même possible d'utiliser les nucléides rejetés par les usines nucléaires; c'est ainsi que Nelson a pu déterminer une vitesse de sédimentation moyenne de 12,5 cm/an dans le Clinch River [32].

5. — Conclusion

Alors que divers chercheurs semblent s'intéresser aux applications de cette méthode au demeurant fort séduisante il nous a paru utile d'en rappeler les limites.

Elle devra toujours être accompagnée de mesures sédimentologiques classiques et être considérée comme un outil complémentaire à la disposition du sédimentologue. Il s'agit, en fait, davantage d'une méthode d'approche permettant de se faire une idée d'ensemble du phénomène, que d'obtenir des résultats exhaustifs.

Moyennant un certain nombre de précautions, elle peut dans certains cas aboutir à des résultats qualitatifs dont les



13/ Interprétation d'un diagramme de rayonnement gamma (d'après L. W. Toelke).

(*) Enregistrement en fonction de la profondeur de la différence de potentiel existant entre une électrode fixée en surface et une électrode mobile dans le sondage.

plus intéressants sont mentionnés dans le texte. Ces quelques exemples sont complétés en bibliographie [33 à 58] par une liste de références que nous avons voulue aussi complète que possible; elles concernent surtout le comportement des radionuclides dans la nature, les applications à la sédimentologie demeurant malheureusement fort peu nombreuses. Il nous reste donc à souhaiter que l'utilisation de cette méthode se développe au cours des prochaines années.

6. — Bibliographie

- [1] TALIBUDEEN (O.). — Natural radioactivity in soils. *Soils and Fertilizers*, vol. XXVII (1964), 347-359.
- [2] JURAIN (G.). — Contribution à la connaissance géochimique des familles de l'uranium-radium et du thorium dans les Vosges méridionales. Application de certains résultats en prospection des gisements d'uranium. Thèse. Université de Nancy (1962). Rapport C.E.A., n° 2154.
- [3] BELL (K.G.). — Uranium and Thorium in sedimentary rocks. *Nuclear Geology, H. Faul, ed., John Wiley and Sons, New York* (1954).
- [4] FRONDEL (J.W.) and FLEISCHER (M.). — A glossary of uranium and thorium bearing minerals *U.S. Geol. Survey Circ.*, 194, (1952), 1-25.
- [5] HURLEY (P.M.) and FAIRBAIRN (H.W.). — Abundance and distribution of uranium and thorium in zircon, sphene, apatite, epidote and Monazite in granitic rocks. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 38, (1957), 939-944.
- [6] BITTEL (R.). — Quelques aspects de radiohydrologie. Etude bibliographique. *Rapport C.E.A.*, n° 59, série biblio (septembre 1965).
- [7] COWSER (K.E.), SNYDER (W.S.) and COOK (M.J.) (1963). — Preliminary safety analysis of radionuclide release to Clinch River. *Tid 7664* (1964), 17-42.
- [8] RODIER (J.) et al. — Les rejets dans le Rhône des effluents radioactifs liquides du Centre de Marcoule. *B.I.S.T.* n° 70, (1963), 7-18.
- [9] FOSTER (R.F.) — Evaluation of radiological conditions in the vicinity of Hanford for 1962. *H.W.*, 76 226 (1963).
- [10] ADAMS (J.A.S.), OSMOND (J.K.) and ROGERS (J.J.W.). — The geochemistry of thorium and uranium. *Physics and chemistry of the Earth*. London, Pergamon Press, (1959).
- [11] DE MORAIS (M.X.). — Radioatividade de cristais de esfena de algumas rochas. *Publ. Museu. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, Centro Estud. Geol. Mem. Notice*, n° 57, (1964), 43-54.
- [12] DE MORAIS (M.X.). — Radioatividade de cristais de alanite de uma rocha da serra do Gerez. *Publ. Museu. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, Centro Estud. Geol. Mem. Notice*, n° 55, (1963), 95-104.
- [13] RAGLAND (P.C.). — Autoradiographic investigations of naturally occurring materials in The Natural Radiation Environment. Published for William Marsh Rice University by the *University of Chicago Press*, (1964).
- [14] KAMEL (A.M.). — Littoral studies near San Francisco using tracers techniques. Technical memorandum n° 131. *Beach Erosion Board*. Department of the Army, Washington, (1962).
- [15] BYERLY (J.R.). — Naturally occurring radioactive minerals as littoral tracers. *Shore and Beach* (April 1963).
- [16] BYERLY (J.R.). — The relationship between watershed geology and beach radioactivity. Technical memorandum n° 135. *Beach Erosion Board*. Department of the Army, Washington, (1963).
- [17] CAILLOT (A.), COURTOIS (G.), DUGAS (F.) et MARTIN (J.M.). — Etude de déplacements de sables par traceurs radioactifs sur le littoral des Landes de Gascogne. Rapport interne C.E.A. DR/AR/SAR.S/67-4/GC/JJ, (1967).
- [18] BELLAICHE (G.), CHEMINEE (J.L.), MARTIN (J.M.) et PAUTOT (G.). — Applications des mesures de bruit de fond gamma à l'étude de l'origine et de la dynamique des sables sous-marins. Ex. de la baie de la Napoule (France), *C.R. Somm. S.G.F.*, fasc. 10 (19 décembre 1966).
- [19] BELLAICHE (G.), PAUTOT (G.), ANGUENOT (F.) et COURTOIS (G.). — Radioactivité naturelle des sédiments marins au large des Côtes de l'Estérel. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 264 (29 mai 1967).
- [20] GRANT GROSS (M.). — Distribution of radioactive marine sediment derived from the Columbia River. *Journal Geoph. Research*, vol. 71, n° 8, (April 15, 1966).
- [21] GRANT GROSS (M.) and NELSON (Jack L.). — Sediment movement on the continental shelf near Washington and Oregon. *Science*, vol. 154, n° 3750 (18 novembre 1966).
- [22] BASTIN (A.). — L'emploi de mesures du bruit de fond pour l'établissement d'une carte lithologique du fond de la mer. Compte rendu. Réunion de travail. Bureau Euristop. *Euratom* 2-4 octobre 1963).
- [23] BASTIN (A.). — Application des traceurs radioactifs et fluorescents à la détermination du mouvement des sédiments dans les cours d'eau et la mer. *Revue des questions scientifiques*, t. XXV (avril 1964).
- [24] BASTIN (A.). — Het gebruik van tracers voor sedimentologisch onderzoek. *Het Ingenieurs Blad*, Jargang 33, n° 8, Bl. 403-448, (1964).
- [25] ALEKSEEV (F.A.), CHATZOV (A.N.) et GOTTICH (R.P.). — L'étude des processus de la sédimentation contemporaine et de la néotectonique dans les zones du Schelf par les méthodes radiométriques sous-marines. *A.I.E.A. Colloque sur l'emploi des radioisotopes en hydrologie*. Vienne (novembre 1966), SM 83/10.
- [26] JOHNSTONE (C.W.). — Detection of natural gamma radiation in petroleum exploration boreholes. *The Natural Radiation Environment*, published for William Marsh Rice University by the *University of Chicago Press* (1964).
- [27] PIRSON (S.J.). — Handbook of well Log analysis for oil and gas, formation evaluation. *Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. N.J.* (1963).
- [28] TOELKE (L.W.). — Scintillometer used in radiation logging. *World Oil*, 135, (1952), 143-144.
- [29] DESBRANDES (R.). — Théorie et interprétation des diagraphies nucléaires. Publication de l'Institut Français du Pétrole. Coll. Sciences et Techniques du Pétrole, n° 13. *Ed. Technip*, (1968), Paris.
- [30] CERRAI (E.), SCHREIBER (B.) and TRIULZI (C.). — Vertical distribution of Sr⁹⁰, Ce¹⁴⁴, Pm¹⁴⁷ and Eu¹⁵⁵ in coastal marine sediment. *Energia nucleare*, vol. 14, n° 10 (octobre 1967).
- [31] SCHREIBER (B.), TASSI PELATI (L.), MEZZADRI (M.G.) and MOTTA (G.). — Gross beta radioactivity in sediments of the North Adriatic sea: a possibility of evaluating the sedimentation rate. *Arch. Oceanogr. Lim.*, 16 (1968), 45-62. *Istituto di Biologia del Mare*, Venezia, Italia.
- [32] NELSON (J.L.), PERKINS (R.W.), NIELSEN (J.M.) and HAUSHILD (W.L.). — Reactions of radionuclides from the Hanford Reactors with Columbia River sediments. Disposal of radioactive wastes into seas, oceans and surface waters. *Proc. Symp. Vienna* (16-20 May 1966), STI/PUB/126-139-161.
- [33] BARKER (F.B.). — Factors affecting the transport of radioactivity by waters. *J. Am. Wat. Works Assoc.*, 50, (1958), 603-612.
- [34] BITTEL (R.), BOURSAT (C.) et PLATZER (R.). — Etude de la fixation du zirconium par la Montmorillonite acide. *Bull. Groupe français Argiles*, 11, (1959), 9-19.
- [35] CARRIGAN (P.H.) et al. — Radioactive minerals in bottom sediment of Clinch River. PART A: Investigations of radionuclides in upper portion of sediments. O.R.N.L. 3721. Contract W-7 405 eng. 26, 94 p. PART B: Inventory and vertical distribution of radionuclides in undisturbed cores, Contract W-7405 eng 26, 92 p. *Oak Ridge National Laboratory*. Oak Ridge, Tennessee, (1967).
- [36] CLANTON (U.S.). — Sorption and release of radionuclides by sediments. *Tid*, 7664 (1963), 113-125.
- [37] COTTRELL (W.D.). — Radioactive wastes in silt of the Clinch and Tennessee River. *O.R.N.L.*, 2847, (1959).
- [38] CURL (H.), CUTSHALL (N.H.) and OSTERBERG (Ch.). — Uptake of chromium by particles in sea water. *Nature*, 205, (1965), 275-276.
- [39] FRIEND (A.G.) and PORCELLA (D.B.). — Studies of the distribution of radionuclides in the Clinch River and Tennessee River below Oak Ridge. *Nuclear Congress*, (1962). Preprint n° 75.

- [40] GRESSE (P.). — Applications des mesures de radioactivité naturelle à la sédimentologie. Exemples du littoral catalan espagnol et de l'estuaire de la Sienne (Manche). *Bull. Soc. Géol. France* 7, VII, (1965), 668-673.
- [41] GOT (H.). — La radioactivité naturelle des sédiments de la baie de Banyuls. *Cahiers océanographiques*, t. XX, n° 3, (mars 1968).
- [42] GROSS (G.) et al. — Radioactivity of the Columbia river effluent. *Science*, vol. 149, n° 3688, (3 septembre 1965), 1088-90.
- [43] HUSTON (K.H.). — A critical appraisal of the technique of using naturally occurring radioactive minerals as littoral tracers. Institute of engineering Research, Hydraulic Engineering Research, Hydraulic Engineering Laboratory wave Research projects, HEL-4-1, *University of California*, California, (1963).
- [44] KLINGEMAN (P.C.) and KAUFMAN (W.J.). — Transport of radionuclides with suspended sediment in estuarine systems. *Contract AT (11.1) 34*, (septembre 1965), 222 p. (S.E.R.L. report n° 65-15). *University of California Berkeley*.
- [45] LOMENICK (T.F.) and GARDINER (D.A.). — The occurrence and retention of radionuclides in the sediments of White Oak Lake, *Health Physics*, vol. 10, (1964).
- [46] NIELSEN (J.M.) and PERKINS (R.W.). — The removal of radioisotopes from the Columbia River by natural processes. *H.W.* 77609, (1963), 366.
- [47] NELSON (J.M.) et al. — Reactions of radionuclides from Hanford Reactors with Columbia River sediments: presented at the Symposium on Disposal of Radioactive Wastes into seas, oceans and surface water. *Int. At. Ag.*, Vienna, (16 to 20 May 1966).
- [48] OSTERBERG (C.M.) et al. — Chromium 51 as a Radioactive tracer of Columbia River at sea. *Science*, vol. 150 (décembre 1965).
- [49] OSTERBERG (C.H.) et al. — Some non biological aspects of Columbia river radioactivity. *Contract A.T.* (45-1) 1750 (1966), 17 p. (CONF-660507-3).
- [50] PERKINS (R.W.). — Studies of Columbia River sediments. *H.W.*, 73, 337, (1963), 125-9.
- [51] PERKINS (R.W.) et al. — Behavior and transport of radionuclides in the Columbia river between Hanford and Vancouver, Washington. *Limn. Oceanogr.*, 11, (April 1966), 235-48.
- [52] RENN (C.E.) and al. — Adsorption of zinc and silver on silt and water handling surface, *Final Report*, NYO 10544, (1964).
- [53] REYNOLDS (T.D.) and GLOYNA (E.F.). — Uptake and release of radionuclides by stream sediments, *J. Wat. Poll. Contr. Fid.*, 36, 3, (1964), 279-80.
- [54] RIVIERE (A.). — Sur la radioactivité des sédiments actuels et récents de la côte méditerranéenne. Etude particulière du Golfe du Lion. Interprétation sédimentologique. *Bull. Soc. Géol. France*, 6^e série, tome V, (1955), 495-505.
- [55] RIVIERE (A.). — Intérêt sédimentologique de la mesure des radioactivités naturelles. *C.R. Acad. Sciences*, 241, (10 octobre 1955), 964-966.
- [56] RIVIÈRE (A.) et VERNHET (S.). — Signification sédimentologique de la radioactivité naturelle des plages du golfe du Lion. *C.R. Acad. Sciences*, Paris, (24 janvier 1966), 440, série D, t. 262.
- [57] RIVIÈRE (A.) et VERNHET (S.). — Etudes littorales. Contribution à l'étude des rivages du Golfe du Lion. Signification sédimentologique des radioactivités naturelles. *Cahiers océanographiques*, n° 10, (1966), 857-900.
- [58] SAWHNEY (B.L.). — Sorption and fixation of microquantities of Cs by Clay minerals. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28, 2, (1964), 183-186.

