

Application des isotopes radioactifs à l'étude des mouvements des sédiments et des galets dans les cours d'eau et en mer

The application of radioactive isotopes
to the study of motion of silt and pebbles
in the rivers and in the sea

PAR

R. HOURS

ET

P. JAFFRY

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE SACLAY
SECTION DES APPLICATIONS DES RADIO-ÉLÉMENTS

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE
DE CHATOU

L'application des traceurs radioactifs à l'étude des déplacements de sédiments a fait depuis 1954 l'objet de travaux nombreux dans divers pays. On passe en revue et on compare différentes techniques de marquage, d'immersion et de détection des vases, sables et galets; on insiste sur l'influence de l'enfouissement du matériau actif. On décrit les différentes expériences effectuées jusqu'à ce jour.

The application of radioactive tracers to the study of sediments drift has received considerable attention since 1954 in various countries. A comparative review is made of a number of techniques of labelling, immersing and detecting silts, sands, and pebbles. The influence of the burying of the active material is emphasized. The different experiments which have been so far carried out are described.

PLAN

INTRODUCTION

I. — OBTENTION DU SÉDIMENT RADIOACTIF

- I A. — Choix de l'isotope radioactif traceur.
- I B. — Emploi d'un sédiment radioactif naturel.
- I C. — Irradiation à la pile d'un sable naturel.
- I D. — Dépôt d'un élément radioactif à la surface du sédiment naturel.
- I E. — Incorporation d'un isotope radioactif à la masse d'un support équivalent au sédiment.
- I F. — Cas particulier des galets.

II. — L'IMMERSION

III. — LA DÉTECTION

III A. — Détecteurs de radioactivité.

III B. — Techniques de détection.

III C. — La réponse du détecteur.

1° *Influence de l'épaisseur de la couche active. — Etude théorique et expérimentale.*2° *La sensibilité limite du détecteur.*3° *Cas particulier des galets.*4° *Les qualités du matériel de détection.*

IV. — LA SÉCURITÉ

IV A. — La sécurité des expérimentateurs.

IV B. — La sécurité du grand public.

V. — LES EXPÉRIENCES

V A. — Les expériences anglaises.

V B. — Les expériences japonaises.

V C. — Les expériences françaises.

V D. — Les expériences suédoises.

CONCLUSIONS

Références bibliographiques.

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION

L'étude du charriage des sédiments dans les cours d'eau et en mer a toujours présenté de grandes difficultés, car les transports les plus importants se produisent en général pendant les crues ou les tempêtes, dans les zones où la violence des courants ou des vagues exclut souvent toute tentative d'observations directes des phénomènes.

Ces difficultés deviennent pratiquement insurmontables en mer, dans les zones de déferlement qui constituent le site privilégié du charriage littoral de sédiments, et il ne reste plus alors à la disposition des ingénieurs, que des méthodes d'observation indirectes.

Citons, parmi celles-ci, l'étude de l'évolution du relief sous-marin, qui permet, par comparaison de levés hydrographiques systématiques, de retracer par étapes les mouvements des masses de sédiment.

Plus intéressantes sont les méthodes qui consistent à rechercher, ou, le cas échéant, à intro-

duire dans le sédiment dont on veut étudier les déplacements, des éléments facilement identifiables qui le « marquent » et permettent ensuite de le suivre au cours de sa dispersion.

On a utilisé, dans ce sens, les minéraux lourds que l'on retrouve presque toujours, en faible proportion, à côté de la silice et du calcaire, dans les sédiments naturels, et qu'il est facile de séparer par l'emploi de liqueurs denses et de soumettre ensuite à des examens minéralogiques.

Toutefois, la méthode n'est valable que si la fraction lourde est vraiment caractéristique du sédiment, et bien souvent, elle n'est applicable qu'à l'étude des migrations sédimentaires à l'échelle des provinces minéralogiques. D'autre part, il n'est pas évident que cette fraction lourde, par définition de forte densité ($> 2,9$), donne une image exacte des mouvements de l'ensemble du sédiment.

Le marquage artificiel du sédiment ne présente

pas à cet égard les mêmes inconvénients. Il est toujours possible, soit de marquer l'ensemble du sédiment, par coloration par exemple, soit d'y introduire un élément de même densité et granulométrie.

Jusqu'à ces dernières années, on a surtout utilisé les traceurs colorés qui ont présenté, dans la pratique, certaines difficultés d'emploi. Outre les difficultés de coloration et la nécessité de mettre en œuvre des quantités importantes de traceurs, la recherche des éléments colorés, dispersés dans la masse des sédiments au cours du charriage, s'est avérée malaisée. Il faut, en effet, procéder à un grand nombre de prélèvements d'échantillons et les soumettre à des examens microscopiques dont l'interprétation reste difficile.

Notons que bien souvent en mer, pendant la mauvaise saison, les tempêtes ne sont séparées que par des périodes de temps calme relativement courtes qui, compte tenu du travail imposé par les prises d'échantillons, ne suffisent pas toujours à assurer la prospection complète des

zones d'études qui permettrait d'analyser les effets d'une période de tempête donnée.

La méthode des traceurs radioactifs constitue un progrès important sur les procédés décrits ci-dessus :

- L'extrême sensibilité des appareils de détection permet d'utiliser des quantités très faibles de traceur et diminue notablement le prix de revient des études;
- Par l'emploi d'un traceur émetteur gamma on peut, en utilisant un appareillage spécialement conçu, le détecter directement sur le fond et procéder à la prospection des zones d'études avec un meilleur rendement.

Nous allons examiner successivement les solutions proposées aux trois problèmes de l'obtention, de l'immersion et de la détection des sédiments radioactifs; ces trois problèmes étant intimement liés, le lecteur voudra bien nous excuser de n'avoir su éviter certaines répétitions.

I. — OBTENTION DU SÉDIMENT RADIOACTIF

En dehors d'un cas particulier [1] qui sera décrit plus loin, l'irradiation directe à la pile du sédiment naturel ne conduit pas en général à un sédiment radioactif utilisable. C'est pourquoi les chercheurs ont pensé à fixer un isotope radioactif (le traceur) soit sur la surface du sédiment naturel lui-même, soit dans la masse d'un matériau artificiel (le support) de caractéristiques mécaniques (forme, densité, granulométrie, résistance mécanique) aussi voisines que possible de celles du sédiment à imiter; dans le premier cas, l'activité fixée est proportionnelle à la surface du grain, dans le second à sa masse, ce qui est préférable.

Il importe évidemment que le traceur soit solidement fixé au support pour ne pas en être éliminé par l'érosion et l'eau de mer.

I A) Choix de l'isotope radioactif traceur.

Pour chaque problème particulier, l'isotope sera choisi à partir de considérations relatives à la période, au rayonnement émis (lié lui-même au mode de détection envisagé), aux facilités d'approvisionnement, au prix de revient, aux conditions pratiques de fabrication et de manipulation du sédiment actif.

Le tableau I donne une liste non limitative d'isotopes radioactifs susceptibles d'être retenus, avec leurs principales caractéristiques.

Examinons l'influence des différents facteurs précités :

1° PÉRIODE :

Le choix de la période (ou demi-vie) est fonction de la durée du phénomène étudié et de la fréquence désirée de répétition des expériences; il est nécessaire en effet d'éviter des interférences entre deux opérations successives.

Forest [4] propose :
durée du phénomène ≤ 4 périodes \leq intervalle entre deux expériences.

En pratique, c'est souvent la dispersion naturelle qui limite la durée d'une expérience.

2° RAYONNEMENT ÉMIS :

Son choix est fonction du mode de détection envisagé et de considérations de sécurité.

Dans le cas de la détection par autoradiographie (voir plus loin) proposée par Golberg [1], le traceur devra émettre un rayonnement β aussi dur que possible.

Dans le cas où un échantillon de sédiment est placé autour d'un détecteur, un rayonnement γ d'énergie moyenne (quelques centaines de keV) suffira

Mais dans le cas le plus intéressant de la mesure directe sur le fond au moyen d'une sonde sous-marine, un rayonnement γ dur (≥ 1 MeV)

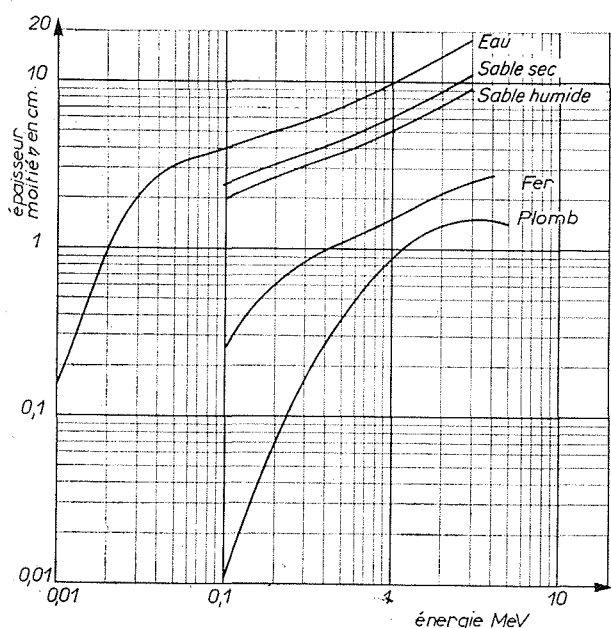


FIG. 1

Épaisseurs moitié η ; valeurs calculées d'après Siegbahn : « β and γ ray spectrometry ».

On peut en tirer le libre parcours moyen $\lambda = \eta / 0,693$ cm et le coefficient d'absorption $\mu = 0,693 \text{ cm}^{-1} / \eta$.

est en général souhaitable, en raison de la forte absorption du rayonnement par l'eau et le sable. La figure 1 donne les épaisseurs d'eau, de sable ou de plomb qui divisent par deux l'intensité d'un faisceau étroit de rayons γ d'énergie variable (épaisseurs moitiés). Cependant, pour atténuer le risque d'irradiation, qui est proportionnel à la dureté du rayonnement, et diminuer le poids des protections de plomb, il peut être parfois avantageux d'utiliser un rayonnement d'énergie moyenne (voir plus loin).

3° FACILITÉS D'APPROVISIONNEMENT :

Elles sont surtout fonction de l'activité spécifique obtenue par irradiation à la pile et du prix de revient, parfois très élevé, de l'élément traceur (voir tableau I).

4° MASSE TOTALE DU SÉDIMENT RADIOACTIF A METTRE EN ŒUVRE :

Elle dépend du procédé de détection choisi, mais varie comme le cube du diamètre des grains; la figure 2 donne la masse à prévoir par hectare marqué pour une densité de 10 grains/m², suffisante pour la détection au moyen d'une grande sonde sous-marine balayant le fond (voir plus loin).

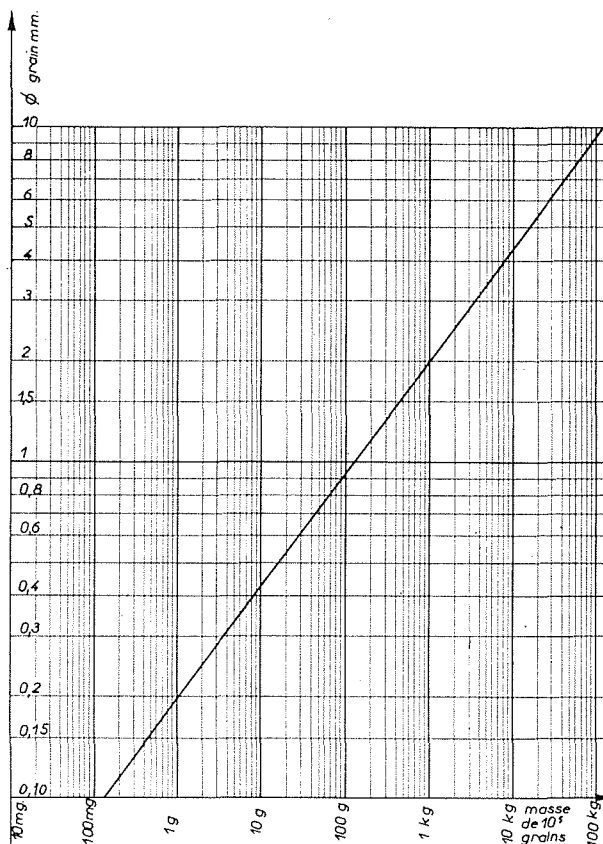


FIG. 2

Masse de sable actif à prévoir par hectare pour une densité superficielle de 10 grains/m². (Masse de 10⁵ grains.)

I B) Emploi d'un sédiment radioactif naturel.

a) Certains sables sont naturellement radioactifs, notamment les sables granitiques; la connaissance de leur répartition peut apporter parfois de précieux renseignements sur l'histoire géologique d'une région (cf. en France, travaux de P. Rivière).

Ainsi, sur la plage de Cannes [5 bis], nous avons trouvé un gradient d'activité naturel dû au charriage d'éléments granitiques par un fleuve côtier voisin.

b) L'idée d'employer un minerai pauvre d'uranium séduit par sa simplicité; nous y avons personnellement renoncé pour plusieurs raisons : le minerai en question est friable, et l'uranium est contenu dans des granules de densité trop élevée; sa période, pratiquement infinie, est gênante si l'on veut effectuer plusieurs expériences successives sur une même plage; sa faible activité spécifique (1 millicurie de radium dans 3 kg d'uranium métal) exige l'emploi de masses importantes, d'un prix de revient finalement élevé comparé à celui des radioéléments arti-

ficiels; enfin la haute toxicité de l'uranium (dose limite dans l'air : 2.10^{-12} curie/m³ d'uranium en équilibre avec ses descendants, soit 6 microgrammes/m³) peut être gênante si l'on opère sur la partie non immergée d'une plage.

I C) Irradiation à la pile d'un sable naturel.

En dehors du silicium 31 de période 2,6 heures, les seuls isotopes radioactifs formés par irradiation directe du sable naturel dans une pile atomique seront dus à des impuretés plus ou moins bien fixées aux grains de quartz. Ce mélange de radioéléments ne sera pas en général d'un emploi commode.

Toutefois, certains auteurs [1] ont signalé l'existence de grès dont les grains de quartz contenaient 250 à 600 p.p.m. de phosphore, et examiné la possibilité de détecter le Phosphore 32 formé par irradiation aux neutrons lents : un échantillon de sable est étalé sur une plaque photographique et les grains marqués apparaissent sous forme de points noirs après une pose de quelques heures à quelques jours suivant l'activité spécifique en P 32; on peut ainsi facilement déceler un grain actif de 0,1 mm de diamètre noyé dans un million de grains inactifs. Les auteurs ont vérifié que le phosphore restait intégralement lié au quartz après 15 jours d'agitation dans l'eau de mer.

Ils citent l'exemple de la plage Santa-Monica, en Californie, qui subit un transport quotidien de 590 m³ de sable; en admettant une dispersion moyenne du million, l'étude du transport pendant un mois nécessiterait l'emploi de 25 kg de sable irradié contenant une quinzaine de millicuries en P 32.

A l'actif de ce procédé, nous noterons l'emploi de sable naturel (bien que ce ne soit pas exactement celui du lieu étudié), la simplicité du matériel de détection, l'absence quasi totale de danger; à son passif, la lenteur des prises d'échantillons et de leur mesure, la séparation éventuelle préalable des grains de quartz des impuretés du sable, la période un peu courte du P 32.

I D) Dépôt d'un élément radioactif à la surface du sédiment naturel.

1° LE MARQUAGE A L'ARGENT 110 :

Premier en date des procédés de marquage en surface, il a été décrit par A. Gibert [2, 3, 3 bis] en 1955; après avoir signalé 8 méthodes de marquage du sable, cet auteur décrit en détail un procédé d'argenteure du sable à partir du ni-

trate d'argent marqué par l'Argent 110; il précise que 70 % de l'argent, après son adhésion au sable, s'y maintient en dépit de l'action de l'eau de mer et du sable lui-même (essais avec agitateur ou en bassin à houle). Le marquage est fait à partir d'une solution de 10 g de nitrate d'argent dans 100 cc d'eau par kg de sable.

La recherche du sable marqué s'effectue d'abord simplement en entourant le détecteur (compteur G.M. ou scintillateur) avec un échantillon de l'ordre du kg. Gibert estime pouvoir ainsi déceler le sable marqué après dispersion par un facteur de l'ordre du million si le marquage initial a été fait à raison de 1 μ C d'Ag 110 par kg de sable (*).

Gibert a, par ailleurs, montré [3] qu'il était possible de ramener dans un seul kilogramme l'argent contenu dans un prélèvement de 100 kg, à condition que la concentration dans ce prélèvement ne descende pas au-dessous de 1 mg de nitrate pour 10 kg de sable. Il conclut qu'il serait possible, bien que difficile et onéreux, de pousser l'application de cette méthode jusqu'à des facteurs de dispersion de 10^{10} (*).

Cette méthode est assez onéreuse en raison du prix du nitrate d'argent (1 kg à 20 dollars pour marquer 100 kg de sable) et de la longueur des opérations éventuelles de reconcentration de l'argent. Elle nous semble néanmoins intéressante, surtout pour les transports à longue distance.

Notons qu'il est parfaitement possible, en augmentant l'activité spécifique de l'argent, d'effectuer une détection directe du sable avec une sonde; Gibert envisage des essais portant sur plusieurs tonnes de sable marquées par plusieurs curies d'Argent 110.

2° LES PROCÉDÉS ANGLAIS DE MARQUAGE EN SURFACE :

A la Conférence de l'UNESCO tenue à Paris en septembre 1957, D.B. Smith et J.D. Eakins [12] ont décrit un procédé très général de marquage du sable naturel par trempage dans une solution radioactive, puis cuisson vers 500°, destiné à fixer l'élément adsorbé sur le sable.

La technique semble bien au point : le sable doit être précédemment lavé; des essais effectués sur des périodes de l'ordre de 15 heures dans un cylindre contenant de l'eau de mer, retourné 18 fois par minute, avec du sable marqué à l'iridium, l'argent, l'or ou la paire baryum-lanthane, ont prouvé l'excellente tenue des éléments adsorbés sur les grains.

(*) Notre expérience personnelle nous incite à diviser par un facteur pouvant atteindre 10, certaines des sensibilités données par Gibert, notamment en raison de la radioactivité naturelle du sable, parfois très variable sur une même plage.

La masse d'élément adsorbée par gramme de sable ne varie pas de plus d'un facteur 2 suivant le type de sable utilisé; le tableau II donne quelques précisions à ce sujet.

Des résultats intéressants ont également été obtenus avec des galets (voir plus loin).

3° LE PROCÉDÉ SUÉDOIS [13] :

L'équipe suédoise du Dr Westermarck a mis au point un procédé de marquage du sable par ébullition dans une solution chlorhydrique de Chrome 51; on a pu fixer ainsi 1 g de chrome par kg de sable; on ne constate aucune perte de chrome, après un séjour de 24 heures dans l'eau de mer à 40° C, du sable actif préalablement lavé. On a ainsi préparé 36 kg de sable à 10 mC/kg.

I E) Incorporation d'un isotope radioactif à la masse d'un support équivalent au sédiment.

Bien que plusieurs supports aient été envisagés (gel de silice, bentonite, voir [5 bis]), deux matériaux ont été retenus : le verre, très largement utilisé déjà, et une résine échangeuse [14].

On reproche souvent à ce procédé de ne pas imiter parfaitement le sable naturel; de nombreux expérimentateurs estiment cependant la ressemblance très suffisante, eu égard aux avantages inhérents à ce procédé.

Nos essais personnels de broyage de verre nous ont montré que tous les types de broyeurs ne conviennent pas également bien. Le broyeur à cylindre, qui donne de longues aiguilles de verre, doit être rejeté. Par contre, les broyeurs à boulets ou à barres donnent des grains de forme satisfaisante, le broyage préliminaire grossier pouvant être effectué au broyeur à mâchoires. Le broyeur à marteaux donne des grains de forme acceptable, mais avec une grande proportion de fines.

Broyer une masse donnée de verre à une granulométrie imposée, sans rejeter trop de fines, exige une certaine technique et beaucoup de patience car il faut fréquemment arrêter le broyage pour tamiser; l'idéal est de disposer d'un tamis en série avec le broyeur avec recyclage automatique des grains refusés, mais ce dispositif est coûteux. Le procédé le plus économique consiste à préparer d'avance un gros stock de verre tamisé d'où l'on extraira les catégories de grains nécessaires pour chaque expérience.

Notons qu'il est par ailleurs possible de donner aux grains de verre une forme sphérique par fusion instantanée dans la flamme d'un chalumeau.

1° EMPLOI D'UN VERRE RADIOACTIF :

C'est le matériau jusqu'ici le plus utilisé [5 bis, 6, 7, 8, 9, 10], car si la forme des grains peut

n'imiter qu'imparfaitement le sable naturel, la granulométrie peut être bien ajustée et la densité très voisine de celle du quartz (2,65); la tenue à la mer est parfaite et le procédé est très souple tant au point de vue du choix de l'isotope que des activités disponibles.

a) Le traceur radioactif est incorporé à la composition avant la fonte :

Cette technique a été utilisée en France [5 bis] et au Japon [6,7]. On peut préparer ainsi des quantités théoriquement illimitées de verre radioactif; en pratique on est limité en activité par le danger de la fonte, du broyage et du tamisage d'activités importantes, à moins de disposer d'une installation coûteuse et délicate de manipulation derrière un mur de plomb avec récupération des poussières.

b) Irradiation à la pile du verre broyé contenant l'élément à activer :

Ce procédé présente moins de risques et permet de préparer des activités très importantes de verre radioactif. Par contre, le volume de verre que l'on peut irradier dans une pile est relativement faible, ce qui limite l'emploi du procédé aux granulométries fines. Les tubes standards d'irradiation ne contiennent que 40 g de verre; à Saclay, nous pouvons cependant irradier dans la pile EL.2 quelques kg de verre dans une brique spéciale sous un influx de 10^{12} n/cm²/s et quelques dizaines de kilogrammes dans ses canaux verticaux, sous un flux de l'ordre de 10^{10} n/cm²/seconde seulement; à Marcoule, nous pouvons irradier des containers de plusieurs litres à des flux de l'ordre de 10^{12} . Remarquons que, pour des masses de cette importance, le prix de l'élément traceur proprement dit peut devenir très élevé (voir tableau I).

Le verre irradié en masses importantes ne doit pas contenir trop d'éléments capteurs de neutrons avec production éventuelle de radioisotopes parasites gênants; en France, un verre répondant à ces exigences a été mis au point par la Compagnie de Saint-Gobain, qui a déjà pu y incorporer du scandium, du tantale et de l'iridium.

2° EMPLOI D'UNE RÉSINE ÉCHANGEUSE :

Une équipe hollandaise [14] a tout récemment mis au point un procédé basé sur l'emploi d'une résine échangeuse inorganique (zéolithe) commercialement nommée Ionac C 50 ou Greensand; son prix est de l'ordre de 200 F/kg; sa densité (2,75) est acceptable; sa dureté naturelle est insuffisante, mais par chauffage à 900° C, ce défaut disparaît, au prix, il est vrai, d'un certain ralentissement de l'échange (2 heures au lieu de 3 minutes pour absorber la quantité nécessaire de

Sc 46). Agitée 48 heures dans l'eau de mer, cette résine a conservé intégralement le scandium absorbé.

Les Hollandais envisagent l'emploi de plusieurs centaines de kg de ce « sable vert » marqué par plusieurs curies de Sc 46.

I F) Cas particulier des galets.

Le premier procédé utilisé tant en Angleterre [11] qu'en France [4] consiste à forer un trou dans le galet pour y loger une source radioactive; le trou est obturé au moyen d'un ciment

expansif; ce procédé est long si l'on veut marquer des milliers de galets.

D.B. Smith a depuis mis au point une méthode de marquage en surface par trempage [12] analogue à celle utilisée pour le sable; les essais de résistance à l'abrasion de la surface marquée ont montré que seuls les galets durs (silex) conservaient pratiquement toute leur activité tandis que les galets plus tendres (grès, calcaire) perdaient non seulement leur activité, mais une partie non négligeable de leur masse; des essais de marquage en profondeur de galets tendres, soumis à un vide préalable, ne sont pas concluants.

II. — L'IMMERSION

Elle nécessite en général, l'emploi d'un appareillage spécialement conçu, d'une part pour assurer la protection des opérateurs, d'autre part pour éviter la dispersion des sédiments fins en cours de chute. Nous décrirons plus loin quelques-uns des dispositifs imaginés.

Les sables et les vase présentent presque toujours une granulométrie fine et la vitesse de chute des grains dans l'eau est faible (quelques cm/s). On risque donc, en libérant le traceur à la surface de l'eau, de le répandre au fond sur une trop grande surface et d'obtenir, dès le début de l'expérience, une dispersion du traceur inutile, et quelquefois même gênante si l'on doit analyser un phénomène localisé.

On cherchera donc à réaliser des dépôts aussi

concentrés que possible en ne libérant le traceur qu'au voisinage du fond.

La protection des opérateurs est réalisée, d'une part grâce à des manœuvres à distance, de l'autre par l'emploi de containers en plomb; ces derniers peuvent être fort lourds lorsqu'on a affaire à des activités élevées d'émetteurs γ durs, et nécessitent alors des moyens de manutention que seules possèdent des embarcations importantes; leur manœuvre par gros temps est toujours délicate; c'est pourquoi nous préconisons, lorsqu'on ne dispose que d'embarcations légères, l'emploi d'émetteurs γ d'énergie moyenne nécessitant des protections de plomb beaucoup moins lourdes (voir plus loin).

III. — LA DÉTECTION

Elle se fera soit directement sur le fond, soit par prélèvement d'échantillons analysés ultérieurement.

III A) Détecteurs de radioactivité.

En dehors de la méthode autoradiographique (voir plus haut § I C), on utilise des compteurs de Geiger-Müller ou des compteurs à scintillation, dont l'efficacité (rapport du nombre de rayons détectés au nombre de rayons ayant traversé le compteur) est très variable :

1° LES COMPTEURS G.M. :

Ils sont simples, robustes, fidèles et peu

coûteux; pour les mesures qui nous intéressent, on peut utiliser :

a) Les compteurs « halogènes » à cathode d'acier inoxydable, fonctionnant sous basse tension (~ 400 volts); leur efficacité en rayons γ est faible, et grossièrement égale en % à l'énergie du photon exprimée en MeV; les rayons γ durs seront donc mieux comptés que les rayons mous.

b) Les compteurs dits « à haute efficacité » dont la cathode est en métal lourd (plomb ou bismuth); leur tension de fonctionnement plus élevée (1 000 - 1 500 V) pose des problèmes d'alimentation et d'isolement plus délicats que dans le cas des compteurs « halogènes », mais leur

efficacité, à peu près indépendante de l'énergie du photon, est de 1 à 2 %.

2° LES COMPTEURS A SCINTILLATION :

Ils ont des efficacités en rayons γ beaucoup plus élevées, qui sont fonction de la nature et de la dimension du « phosphore » (iodure de sodium, anthracène, plastique) et atteignent plusieurs dizaines de % en γ durs, et près de 100 % en γ mous; mais ils sont plus coûteux, plus fragiles et moins stables que les compteurs G.M.

III B) Techniques de détection.

L'intérêt de la méthode est de pouvoir déceler les mouvements de sédiments provoqués par une tempête ou une crue donnée. Les expériences ont donc lieu principalement pendant les mauvaises saisons, où les tempêtes et les crues se succèdent à intervalles rapprochés et où les périodes de temps calme, parmi lesquelles les détections sont possibles, sont rares et de courte durée.

C'est pourquoi nous n'examinerons que la détection directe soit au moyen d'un détecteur portatif si le sédiment est à sec, soit le plus souvent au moyen d'une sonde sous-marine.

La détection peut se faire point par point : méthode lente que les vagues et le courant peuvent rendre délicate.

En France, nous avons préféré la technique de remorquage de la sonde avec enregistrement, propre à assurer dans le minimum de temps le relevé complet d'une zone radioactive. La sonde est reliée à un intégrateur de constante de temps réglable, lui-même couplé à un enregistreur (fig. 3).

Les dimensions de la zone active et le gradient d'activité déterminent le choix de la vitesse

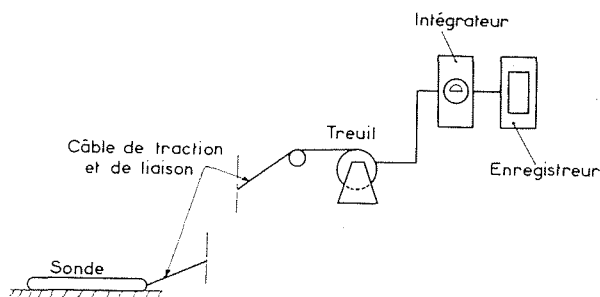


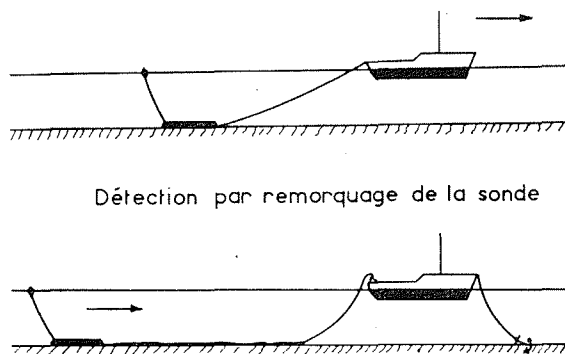
FIG. 3

Schéma de principe de l'appareillage de détection.

III C) La réponse du détecteur.

1° Influence de l'épaisseur de la couche radioactive.

En dehors d'une méthode récemment proposée [14], la mesure directe au moyen d'une sonde sous-marine ne permet pas en général de connaître l'épaisseur de la couche radioactive, et c'est là



Détection par traction à l'aide d'un treuil (bateau ancré)

FIG. 4

Schéma de principe des méthodes de détection.

de traction et de la constante de temps d'intégration; nous distinguons deux cas :

1° Pour l'étude d'une zone étendue, la sonde est tirée sur le fond par un câble d'une cinquantaine de mètres (fig. 4 haut) fixé au navire remorqueur; la position du remorqueur et de la sonde est déterminée par les méthodes ordinaires de l'hydrographie.

Le remorquage peut être délicat dans les zones très voisines de la côte, les zones rocheuses et les zones peu profondes. Par ailleurs, la gamme de vitesses de traction dont on dispose est étroite : d'une part, en dehors du cas des navires hydrographiques dont le gouvernail est prévu pour des évolutions à basse vitesse, les navires évoluent habituellement mal à des vitesses inférieures à 1 m/s; d'autre part, à des vitesses notablement plus grandes, la sonde a tendance à quitter le fond.

2° Pour l'analyse détaillée d'une zone active étroite ou de fort gradient, ou lorsque les déplacements des sédiments sont de l'ordre de la précision du point hydrographique, le câble est déroulé sur plusieurs centaines de mètres, et la sonde ramenée à bord du bateau ancré, à la vitesse désirée, au moyen d'un treuil dont le mouvement commande le développement du papier de l'enregistreur (fig. 4, bas).

Forest [4] fait remarquer que la sonde peut mettre le sédiment en suspension; cet inconvénient disparaît dès que la tache est grande comparée à la sonde, c'est-à-dire très rapidement.

une des principales critiques adressées à cette technique; nous allons examiner, par le calcul et par l'expérience, comment varie la réponse du détecteur lorsque la couche radioactive, d'abord superficielle, épaissit en se mélangeant au sédiment naturel.

a) Calcul approché de la réponse du détecteur à une couche radioactive.

Nous distinguerons deux sortes de détecteurs :

- Le détecteur isotrope, qui présente la même surface S au rayonnement d'où qu'il vienne; c'est un détecteur idéal, dont se rapproche une sphère de diamètre petit vis-à-vis de la distance à la source;
- Le détecteur directionnel, détecteur plan qui n'offre au rayonnement qu'une surface $S \cos \theta$, θ étant l'angle du rayon et de la normale; il est parfaitement représenté par une plaque photographique.

La plupart des détecteurs réels sont semi-directionnels.

α) Considérons un détecteur isotrope de surface unité, entouré d'une enveloppe métallique sphérique de rayon r , d'épaisseur b , placé dans l'eau à une hauteur d_1 au-dessus d'une couche de sable radioactif d'épaisseur l , reposant elle-même sur une couche d'épaisseur infinie de sable inactif.

Nous supposons que chaque centimètre cube de sable actif émet, dans tout l'angle solide, S_v photons d'énergie E par seconde. Soient μ_1, μ_2, μ_3 , les coefficients d'absorption respectifs, pour ces photons γ , du sable saturé d'eau, de l'eau et du métal.

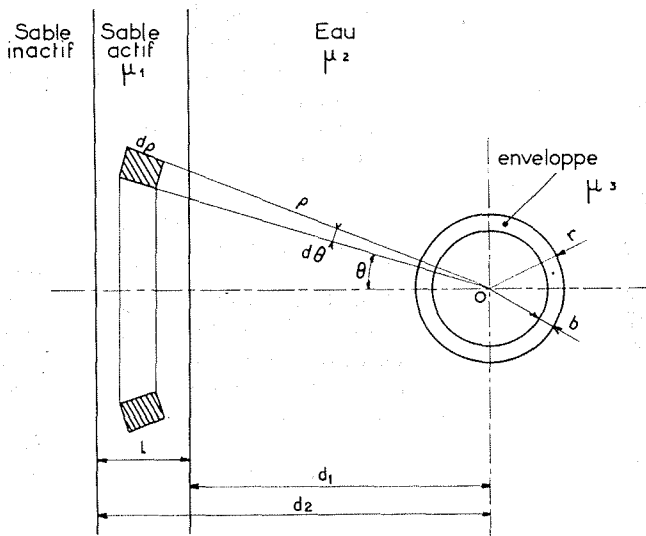


FIG. 5

Calcul du rayonnement émis par une couche épaisse de sable actif.

Considérons l'anneau élémentaire conique hachuré, d'ouverture $d\theta$, de hauteur $d\varphi$, de volume $2\pi\varphi \sin\theta d\theta d\varphi$. Il envoie par seconde dans le détecteur dI photons primaires :

$$dI = (2\pi\varphi \sin\theta d\theta d\varphi) S_v e^{-\mu_3 b} (1/4 \pi \varphi^2) e^{-\mu_1 [\rho - (d_1/\cos\theta)]} e^{-\mu_2 [(d_1/\cos\theta) - r]}$$

Le flux total reçu par le détecteur sera :

$$I = \frac{1}{2} S_v e^{\mu_2 r - \mu_3 b} \int_0^{\pi/2} [e^{(\mu_2/\cos\theta)} (\mu_1 - \mu_2) \sin\theta d\theta \int_{d_1/\cos\theta}^{d_2/\cos\theta} e^{-\mu_1 \rho} d\varphi]$$

Or :

$$\int_{d_1/\cos\theta}^{d_2/\cos\theta} e^{-\mu_1 \rho} d\varphi = (1/\mu_1) [e^{-(\mu_1 d_1/\cos\theta)} - e^{-(\mu_1 d_2/\cos\theta)}]$$

d'où :

$$I = S_v e^{\mu_2 r - \mu_3 b} / 2 \mu_1 \int_0^{\pi/2} [e^{-(\mu_2 d_1/\cos\theta)} \sin\theta d\theta - e^{[(\mu_1 - \mu_2) d_1 - \mu_1 d_2]/\cos\theta} \sin\theta d\theta]$$

Posons :

$$U = \int_0^{\pi/2} e^{-(\mu_2 d_1/\cos\theta)} \sin\theta d\theta \text{ et } V = \int_0^{\pi/2} e^{-[\mu_1 (d_2 - d_1) + \mu_2 d_1]/\cos\theta} \sin\theta d\theta$$

Notons que $d_2 - d_1 = 1$; nous aurons :

$$I = \frac{S_a e^{\mu_2 r - \mu_1 b}}{2 \mu_1} (U - V)$$

Le calcul de U et V s'effectue en faisant le changement de variables :

$$y = \frac{\mu_2 d_1}{\cos \theta} \text{ pour U et } y = \frac{\mu_1 l + \mu_2 d_1}{\cos \theta} \text{ pour V}$$

qui conduisent à :

$$U = \mu_2 d_1 \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy \text{ et } V = (\mu_1 l + \mu_2 d_1) \int_{\mu_1 l + \mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy$$

La fonction :

$$\int_y^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy$$

est une intégrale exponentielle, inintégrable; nous en avons trouvé les valeurs dans une publication de Sievert [15].

β) Examinons comment varie I(l) quand, à activité superficielle S_a constante, l tend vers zéro; S_a représente le nombre de photons émis par cm^2 de source. Posons :

$$l S_a = S_a \text{ et } A = e^{\mu_2 r - \mu_1 b} / 2. \text{ Nous avons : } I(l) = (A S_a / \mu_1 l) (U - V), \text{ d'où :}$$

$$I(l) = (A S_a / \mu_1 l) \left[\mu_2 d_1 \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy - \mu_2 d_1 \int_{\infty}^{\mu_1 l + \mu_2 d_1} (e^{-y/y^2}) dy - \mu_1 l \int_{\mu_1 l + \mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy \right] \quad (1)$$

Cherchons la limite de I(l) lorsque l tend vers zéro; posons donc : $\mu_1 l = \varepsilon$, ou $l = \varepsilon / \mu_1$. On a :

$$I(\varepsilon / \mu_1) = A S_a \left[\mu_2 d_1 / \varepsilon \int_{\mu_2 d_1}^{\mu_2 d_1 + \varepsilon} (e^{-y/y^2}) dy - \int_{\mu_2 d_1 + \varepsilon}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy \right]$$

or :

$$1/\varepsilon \int_{\mu_2 d_1}^{\mu_2 d_1 + \varepsilon} (e^{-y/y^2}) dy \rightarrow (e^{-\mu_2 d_1} / [\mu_2 d_1]^2) \text{ quand } \varepsilon \rightarrow 0, \text{ d'où finalement :}$$

$$I(0) = A S_a \left[(e^{-\mu_2 d_1} / \mu_2 d_1) - \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y^2}) dy \right]$$

ou, enfin :

$$I(0) = A S_a \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y/y}) dy = S_a e^{\mu_2 r - \mu_1 b} / 2 \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} e^{-y/y} dy \quad (2)$$

On montre en effet facilement, en dérivant par rapport à x, que :

$$\int (e^{-x/x}) dx = - (e^{-x/x}) - \int (e^{-x/x^2}) dx$$

les valeurs de l'intégrale exponentielle :

$$\int_y^{\infty} (e^{-y/y}) dy$$

ont été également extraites de la publication de Sievert [15].

On voit, dans (1), que si l tend vers l'infini, I(l) tend vers zéro, ce qui était évident a priori

γ) Examinons maintenant comment varie le rapport I(l)/I(0) quand, à activité totale constante, la couche active superficielle d'activité S_a épaisit par mélange avec le sédiment naturel.

Nous avons fait le calcul dans le cas de rayonnements de 0,3 MeV (énergie principale de l'Ir 192), et de 1 MeV (énergie moyenne Sc 46). En

admettant que le sable se compose de grains de quartz pur avec un indice de vide de 1/3, nous avons :

1° pour 1 MeV :

μ quartz pur = 0,166 cm^{-1} , d'où $\lambda = 1/\mu = 6 \text{ cm}$,

$\lambda = 1/\mu$ est le libre parcours moyen ou longueur de relaxation;

μ eau = $\mu_2 = 0,07 \text{ cm}^{-1}$, d'où $\lambda_2 = 14,3 \text{ cm}$, d'où le coefficient μ_1 pour le sable saturé d'eau;

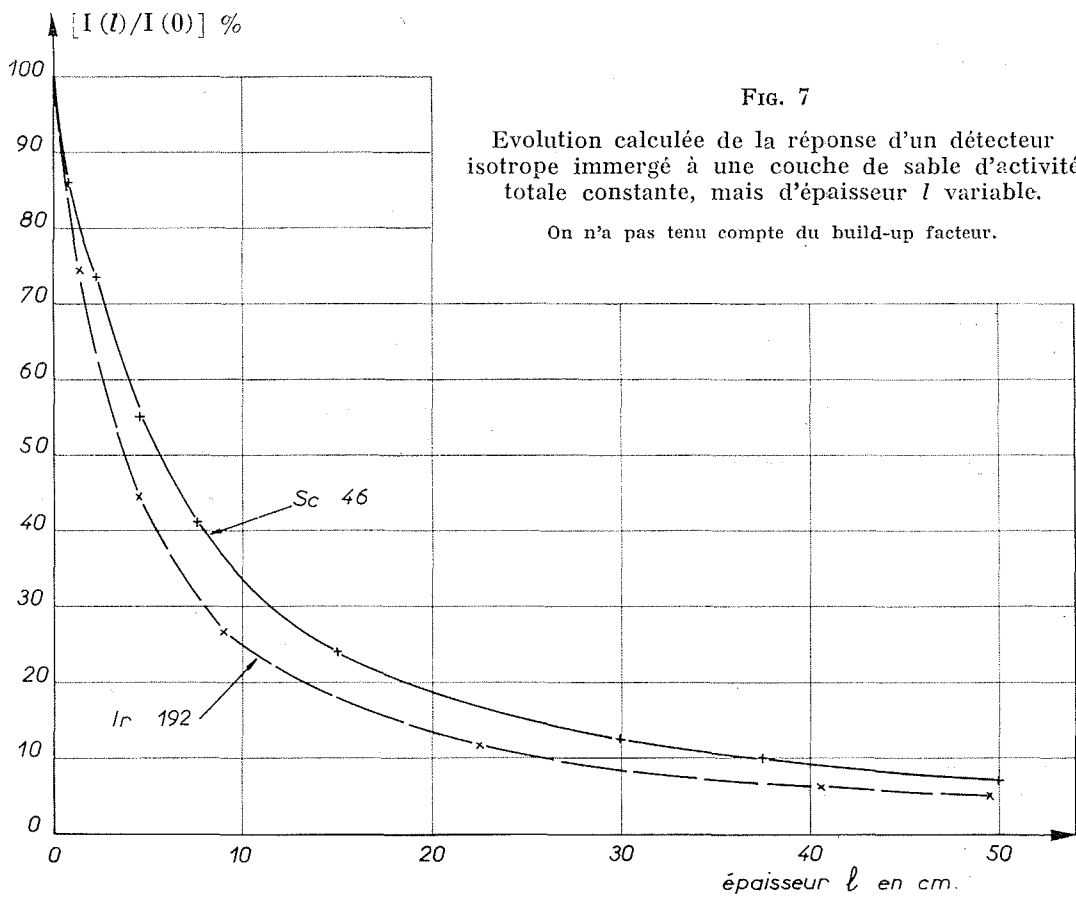
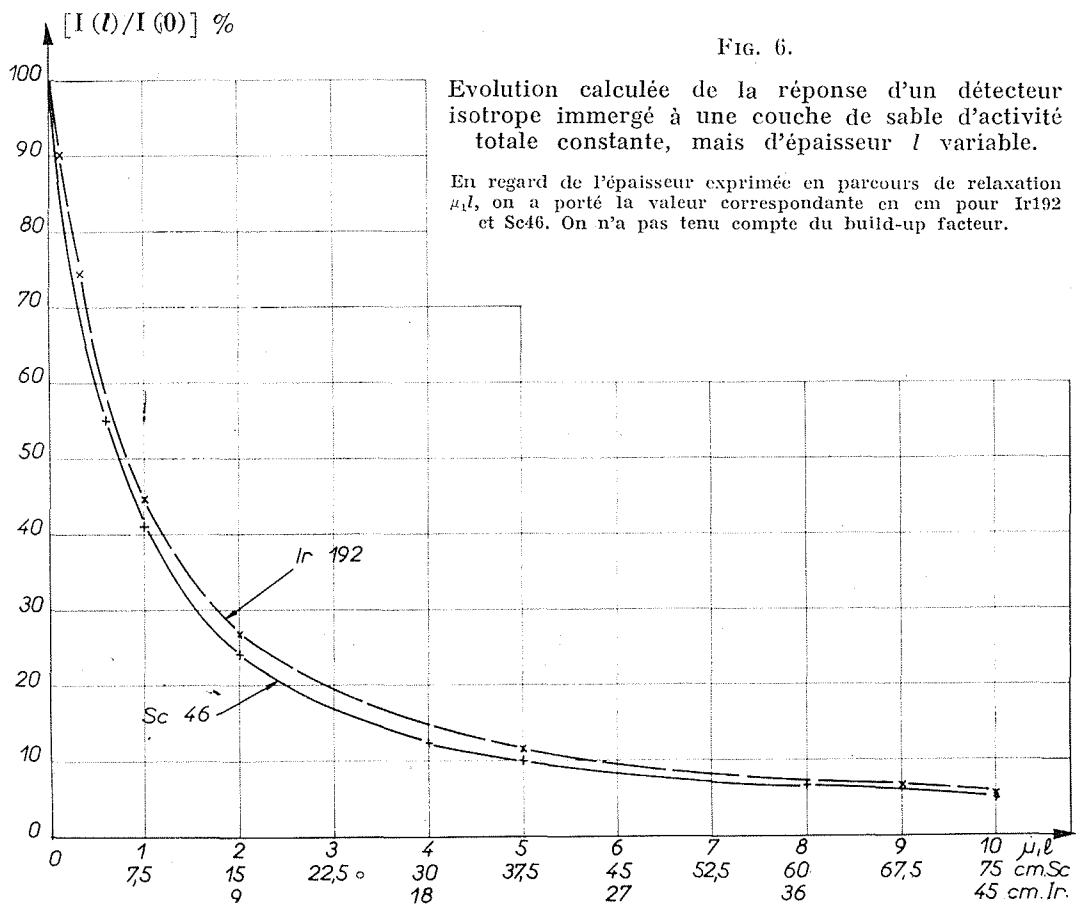
$\mu_1 = (2/3) \times 0,166 + (1/3) \times 0,07 = 0,133 \text{ cm}^{-1}$
et $\lambda_1 = 7,5 \text{ cm}$.

2° pour 0,3 MeV :

μ_2 (eau) = 0,112 cm^{-1} , soit $\lambda_2 = 8,9 \text{ cm}$;

μ quartz pur = 0,275 cm^{-1} , d'où $\mu_1 = 0,221 \text{ cm}^{-1}$
et $\lambda_1 = 4,5 \text{ cm}$.

Les courbes des figures 6 et 7 donnent le rap-



port $I(l)/I(0)$, l'épaisseur de la couche étant exprimée en longueurs de relaxation ($\mu_1 l = l/\lambda_1$) pour la figure 6 et en cm pour la figure 7.

La figure 7 montre que, malgré la grande différence des énergies, les rapports $I(l)/I(0)$ ne sont pas très différents. Cela tient à ce que, dans le sable et dans l'eau, l'absorption se fait principalement par effet Compton, et que les coefficients d'absorption Compton ne sont pas très différents pour 1 MeV et 0,3 MeV. Par contre, en raison de l'effet photo-électrique, le coefficient d'absorption dans le plomb est beaucoup plus grand pour l'Iridium que pour le scandium et ceci justifie l'emploi de l'Iridium sur les lieux d'expériences où l'on ne dispose pas de moyens de manutention puissants : pour un même poids de container en plomb, on pourra transporter une activité beaucoup plus grande en Ir 192 qu'en Sc 46, et l'influence de l'enfouissement ne sera pas beaucoup plus importante pour l'Ir que pour le Sc.

δ) CALCUL DU TAUX DE COMPTAGE DE DIFFÉRENTS DÉTECTEURS RÉELS EN PRÉSENCE D'UNE COUCHE ACTIVE SUPERFICIELLE.

Nous supposons $d_1=r=4$ cm $b=0,4$ cm, et nous admettrons une activité superficielle de $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$, correspondant à :

$$3,7 \text{ désintégrations}/\text{cm}^2/\text{s} \text{ (3,7 d p s)}.$$

1° SCANDIUM 46. — COUCHE SUPERFICIELLE INFINIE :

Nous admettrons qu'il y a émission de 2 photons de 1 MeV par désintégration

$$S_a=7,4 \varphi/\text{cm}^2 \times \text{s}.$$

Calculons A, en supposant l'enveloppe du détecteur en acier.

$$\text{On a : } \mu_3 \text{ (acier)}=0,45 \text{ cm}^{-1},$$

$$\text{d'où } A=(e^{\mu_2 r} \times e^{\mu_3 b})/2=(1,32 \times 0,84)/2=0,55$$

$$I(0)=A S_a \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y}/y) dy=3,9 \varphi/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$$

Prenons le cas de quelques détecteurs réels que nous considérerons comme isotropes :

a) Compteur GM type 13 G 14, cathode bismuth,

- longueur utile : 20 cm,
- diamètre cathode : 2,7 cm,
- efficacité φ : 1 %.

En admettant que ce détecteur ait une surface utile de 60 cm², nous aurons un taux de comptage de 2,3 chocs nets/s.

b) Compteur halogène type 3 G 3, cathode acier inoxydable,

- longueur utile : 18,5 cm,
- diamètre cathode : 1,6 cm,
- efficacité φ : 1 %.

En admettant une surface utile de 30 cm², nous arrivons à un taux de comptage de 1,2 chocs nets/s.

c) Cristal INa de 1''3/4 \varnothing \times 2'' h.

En prenant une surface utile de 20 cm² et une efficacité de 50 %, on arrive à un taux de comptage de 39 chocs nets/s.

d) Cas d'un détecteur directionnel :

Un calcul analogue à celui déjà fait montre qu'un détecteur directionnel, de surface unité, parallèle à une couche active superficielle à une distance d_1 , recevra un flux $J(0)$:

$$J(0)=e^{\mu_2 r - \mu_3 b} \times (S_a/2) \times \mu_2 d_1 \times \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y}/y^2) dy$$

Dans le cas du scandium, avec les données du paragraphe précédent, on trouve :

$$J(0)=1,85 \varphi/\text{cm}^2/\text{s},$$

soit grossièrement $J(0)=1/2 I(0)$.

Si un cristal d'INa de 1'' 3/4 \times 2'' peut assez bien être considéré comme un détecteur isotrope, par contre les compteurs de Geiger longs représentent un cas intermédiaire entre le détecteur isotrope et le détecteur directionnel et il serait plus correct de considérer qu'ils reçoivent un flux compris entre $I(0)$ et $J(0)$.

2° IRIDIUM 192. — COUCHE SUPERFICIELLE INFINIE :

Nous admettrons qu'il y a émission de 1 φ de 0,3 MeV par désintégration,

$$S_a=3,7 \varphi/\text{cm}^2 \times \text{s}$$

$$\text{Prenons } \mu_2=0,112 \text{ cm}^{-1}, \mu_3=0,83 \text{ cm}^{-1}$$

$$e^{\mu_2 r} \times e^{-\mu_3 b}=1,57 \times 0,72=1,13; \text{ d'où } A=0,56$$

On trouve :

$$I_0=1,23 \text{ photons}/\text{cm}^2/\text{s}$$

$$J_0=0,76 \text{ photons}/\text{cm}^2/\text{s}$$

Ceci conduit, pour le compteur 13 G 14 à bismuth, avec une efficacité de 1 %, à un taux de comptage compris entre 0,74 et 0,45 chocs nets/s.

Pour le cristal 1 3/4'' \times 2'', considéré comme isotrope, on arrive à 17 chocs nets/s en admettant une efficacité de 70 %.

3° SCANDIUM 46. — COUCHE SUPERFICIELLE LIMITÉE :

Nous avons également examiné comment variait le flux reçu par un détecteur isotrope lors-

que l'angle θ d'ouverture du cône est inférieur à $\pi/2$. On trouvera sur la figure 8 le rapport :

$$I(0, \theta)/I(0, \pi/2) = \int_{\mu_2 d_1}^{\mu_2 d_1 / \cos \theta} (e^{-y}/y) dy : \int_{\mu_2 d_1}^{\infty} (e^{-y}/y) dy$$

des flux reçus pour les ouvertures θ et $\pi/2$ quand θ varie, en supposant $E=1$ MeV, $d=4$ cm, $\mu_2=0,07$ cm⁻¹; ainsi que le rayon $z=d_1 \operatorname{tg} \theta$

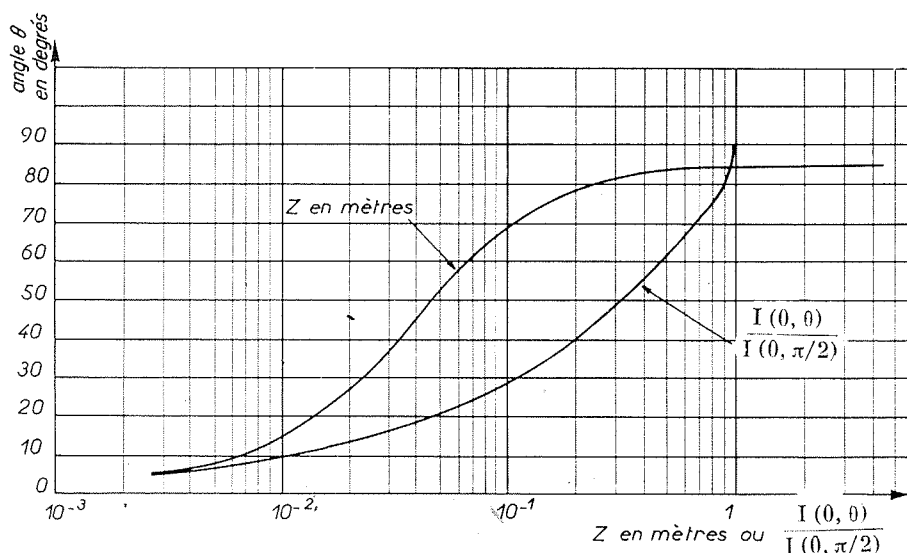


FIG. 8

Activité délivrée par un disque de rayon z mètres vu depuis le détecteur sous un demi-angle θ .

$=4 \operatorname{tg} \theta$ du disque radioactif limité par ce cône.

On voit que $I(0, \theta)$ atteint 50 % de $I(0, \pi/2)$ pour $\theta=61^\circ$, correspondant à $z=7,25$ cm, et à un angle solide $2\pi(1 - \cos \theta)=0,515 \times 2\pi$, soit à peu près la moitié du demi-angle solide total.

b) Influence de l'épaisseur de la couche radioactive. Résultats expérimentaux.

a) LES RAISONS DE CES MESURES :

Il était souhaitable de contrôler les calculs précédents par des mesures pour les raisons suivantes :

1° Dans les calculs, on a considéré que seuls les photons primaires, se dirigeant dès leur émission vers le détecteur et non déviés dans les milieux absorbants, pouvaient atteindre ce détecteur; en réalité, un grand nombre de photons diffusés une ou plusieurs fois avec perte d'énergie peuvent également l'atteindre. Le rapport du nombre total de photons détectés, au nombre de photons primaires détectés, appelé « number build up factor », qui peut atteindre plusieurs dizaines et même centaines d'unités, n'étant accessible au calcul que dans des cas très simples, le mieux est de le mesurer quand on le peut. Du fait de ce « build up », les calculs précédents

ne donnent qu'une limite très inférieure de la réponse du détecteur.

2° Les détecteurs réels ne sont jamais vraiment isotropes; un cristal cylindrique dont la hauteur est voisine du diamètre s'en rapproche, mais les calculs supposent implicitement que les dimensions verticales du détecteur sont petites vis-à-vis de sa distance

au sable et du libre parcours des photons dans l'eau.

3° La sensibilité spectrale du détecteur n'est connue que de façon approchée.

4° La distribution des photons émis par l'isotope, si elle est bien connue dans le cas du Sc 46, est discutée dans celui de l'Ir 192, pour lequel l'énergie adoptée de 0,3 MeV n'est que l'énergie la plus fréquente.

b) LE PRINCIPE DES MESURES :

Une couche de sable de 3 cm d'épaisseur est placée au fond d'une cuve en « Afcodur » à base carrée de 1 m \times 1 m pour 0,75 m de profondeur; sur cette première couche, est placée une couche mince de sable actif, simulée par une feuille de papier buvard de 0,85 m \times 0,85 m imbibée de solution radioactive (quadrillage de 5 cm de côté : 1 goutte au centre de chaque carré, une goutte à chaque sommet; précautions spéciales prises pour tenir compte de l'effet de bord); la feuille de buvard est enfermée entre deux feuilles de polythène soudées; le tout serré entre deux feuilles d'aluminium de 0,5 mm (haut) et 1 mm (bas) d'épaisseur. Cette source plane est couverte d'une épaisseur croissante de sable jusqu'à 14 cm, puis de 50 cm d'eau.

Les différents détecteurs sont placés successivement au centre de la cuve, reposant sur le sable; on a essayé :

1° Les compteurs Geiger type 3 G 3 et 13 G 14 précédemment décrits; ils sont placés bout à bout dans un tube de laiton de 1 mm de paroi (fig. 9); on peut placer autour du tube des

Sc_2O_3 a été transformé en Cl_2Sc soluble par action de ClH concentré (on va trois fois à sec au bain de sable). Les deux solutions ont été étalonnées par la Section mesures du C.E.A.; chaque source plane avait, au moment des mesures, une activité totale de l'ordre de $35 \mu C$.

Les corrections dues au temps mort de cha-

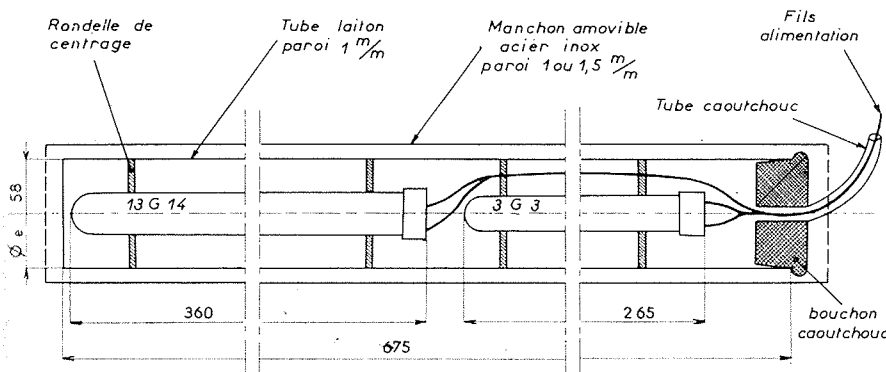


Fig. 9

Disposition des compteurs Geiger dans la cuve.

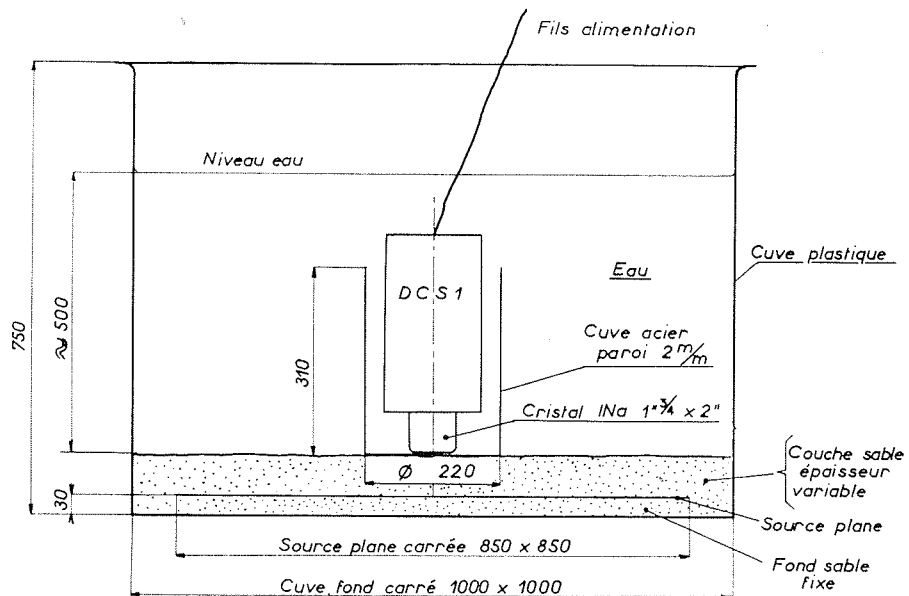
manchons d'acier inoxydable de 1 et 1,5 mm de paroi.

2° Un cristal d'iodure de sodium de $1 \frac{3}{4} \times 2$,

que détecteur avaient été déterminées préalablement grâce à une série de sources de cobalt d'activité croissante (boîte de poids radioactifs).

Fig. 10

Disposition du scintillateur D.C.S. 1 dans la cuve.



placé au fond d'une cuve borgne d'acier de 2 mm de paroi (fig. 10), adapté à l'ensemble de comptage C.E.A. type DCS 1 réglé pour détecter les rayons γ d'énergie supérieure à 60 keV.

Deux sources planes ont été préparées à partir de Sc_2O_3 et d' $Ir Cl_6 (NH_4)_2$ irradiées dans le même tube; le sel d'iridium est soluble; le

c) LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :

Les mesures ont été effectuées avec et sans eau; mais nous ne donnerons que les résultats obtenus sous 50 cm d'eau.

Une partie des courbes représentées sur les figures 11, 12, 13 et 14 donnent les taux de comptage *nets* ramenés à une source de $1 \mu C/m^2$ lorsque la source plane est recouverte d'une

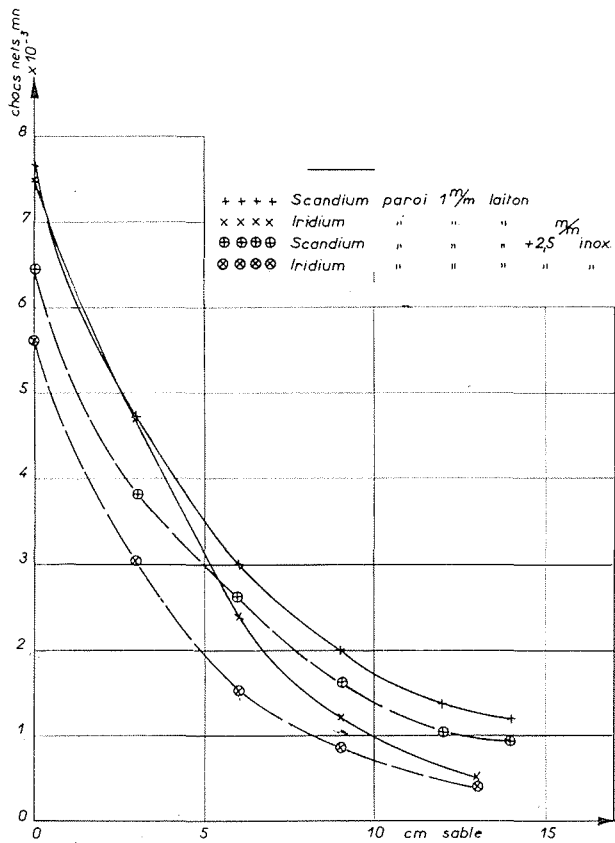


FIG. 11

Compteur GM 13 G 14 (cathode bismuth).
Enfouissement d'une source plane de $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$.

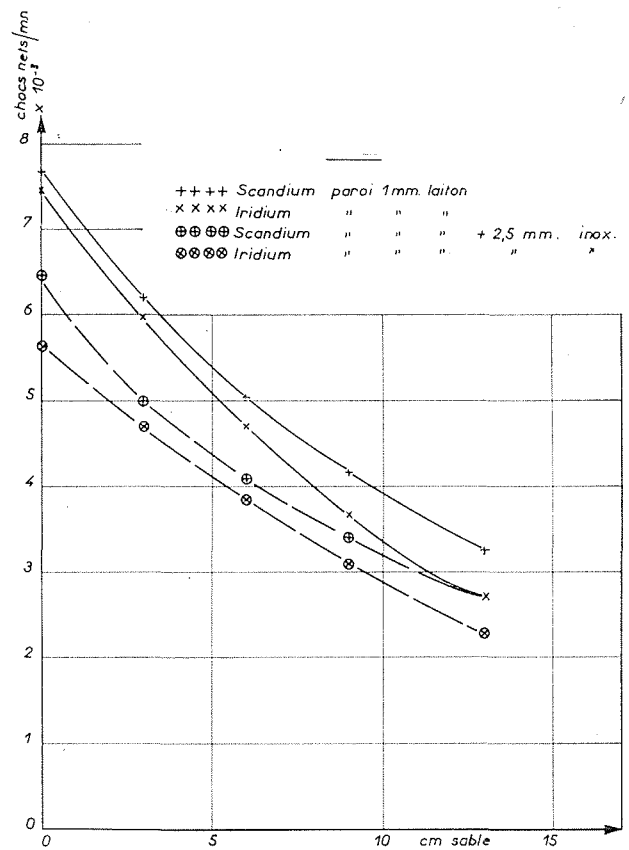


FIG. 13

Compteur GM halogene 3 G 3 (cathode inox).
Scandium 46.

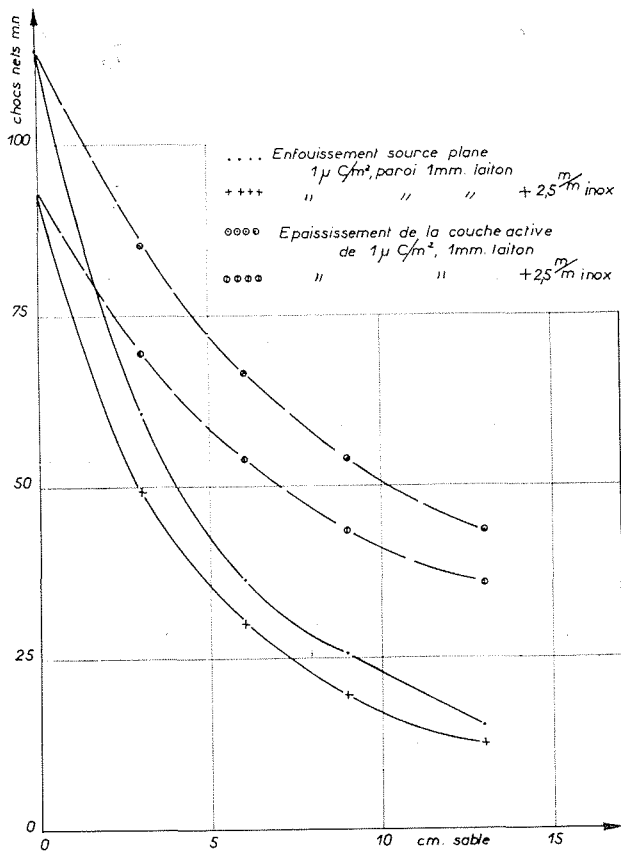


FIG. 12

Compteur GM 13 G 14 (cathode bismuth).
Epaisseur de la couche active de $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$.

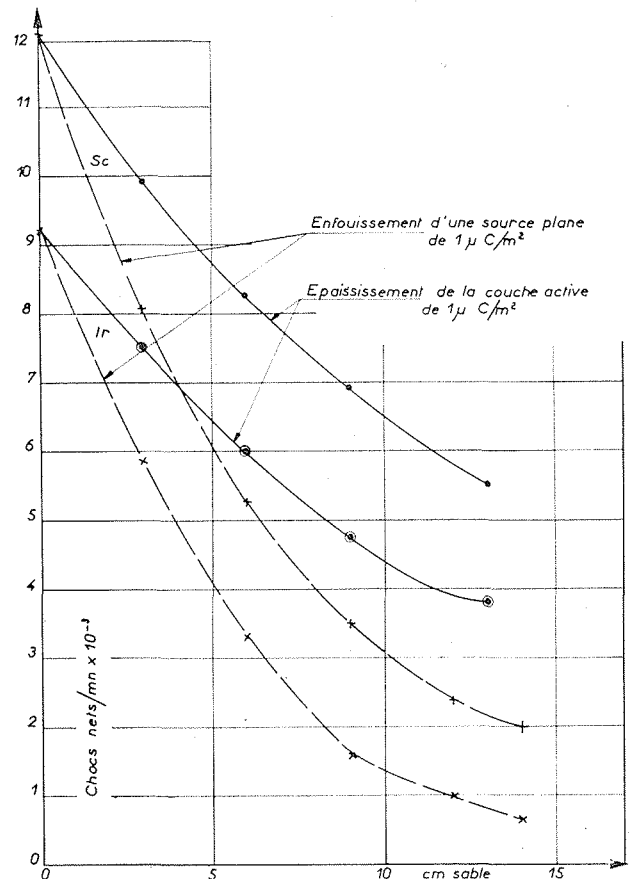


FIG. 14

Scintillateur D.C.S. 1. Cristal 1 Na $1'' \frac{3}{4} \times 2''$,
paroi 2 mm acier.

épaisseur croissante de sable (enfouissement de la source plane).

Par intégration des courbes précédentes, on obtient (fig. 12, 13, 14) les taux de comptage nets en supposant que l'activité de 1 μ C est répartie régulièrement dans une couche de sable d'épaisseur variable (épaississement de la couche active). On voit que :

- 1° Les taux de comptage effectifs sont toujours plus élevés que ceux donnés par le calcul (influence du « build up factor »);
- 2° Bien que plus sensible à l'enfouissement, l'Iridium 192 est parfaitement utilisable; mais il est recommandé de donner au détecteur une enveloppe métallique mince.

d) COMMENT CONNAITRE L'ÉPAISSEUR OU L'ENFOUISSEMENT DE LA COUCHE ACTIVE :

La mesure directe ne permettra pas en général d'atteindre ces valeurs : la méthode ne sera donc que semi-quantitative.

Pour connaître cet enfouissement, il sera nécessaire de prélever des carottes verticales de sable sans en altérer la distribution; un laboratoire hollandais a mis au point un carottier [14, § 4.2.8] permettant l'extraction de carottes de 2 m de hauteur; l'analyse d'une telle carotte ne présente pas de difficultés à condition que la densité de grains actifs y soit suffisante; le procédé sera précis, mais lent.

Les Hollandais [14, § 4.2.7] font également remarquer que l'emploi d'un sélecteur d'amplitude capable de séparer les deux raies γ du Sc 46, permet de distinguer une faible activité superficielle d'une forte activité en profondeur. Ce dernier procédé, susceptible d'être adapté à une méthode d'enregistrement continu, donc rapide, nous semble particulièrement digne d'intérêt.

2° La sensibilité limite du détecteur. - Choix de l'activité spécifique du matériau actif.

L'activité superficielle minimum décelable (AMD) dépend de la surface totale des éléments détecteurs, de leur nature, du rayonnement émis et de la constante de temps de l'intégrateur.

Le tableau III donne la réponse expérimentale des différents détecteurs étudiés à une couche superficielle de 1 μ C/m², sous l'eau.

D'une façon générale, soit :

- N_f le mouvement propre,
- N_n le taux de comptage net dû aux grains radioactifs,
- N_t le taux de comptage total.

L'écart standard σ_{N_n} d'une mesure isolée par rapport à la moyenne \bar{N}_n sera, pour une constante de temps τ :

$$\sigma_{N_n} = \sqrt{(\bar{N}_t/2\tau) + \bar{N}_t/2\tau}$$

On admet en général comme AMD celle qui correspond à une activité nette :

$$N_n = 2 \sigma_{N_f} = 2 \sqrt{\bar{N}_f/2\tau}$$

valeur qui n'a que 2,5 chances sur 100 d'être due à une fluctuation du mouvement propre.

En pratique, il sera prudent de choisir comme AMD une activité nette notablement supérieure à $2 \sigma_{N_f}$, pour tenir compte des variations possibles de l'activité naturelle du sable et des dérives éventuelles du système de mesure.

Le tableau III montre que l'AMD est en général nettement inférieure à 1 μ C/m². Il convient cependant qu'à l'AMD corresponde une densité superficielle de grains suffisante, ce qui peut s'exprimer en disant que la fluctuation relative du nombre de grains balayés doit être du même ordre de grandeur que la fluctuation relative du taux de comptage.

Dans l'hypothèse simplificatrice de grains de même activité distribués suivant une loi de Poisson, ceci conduit à :

$$\frac{1}{\sqrt{2 l v d \tau}} = \frac{\sigma_{N_n}}{\bar{N}_n} = \frac{\sqrt{(\bar{N}_t/2\tau) + (\bar{N}_t/2\tau)}}{\bar{N}_t - \bar{N}_f}$$

où l est la largeur de la sonde,

v la vitesse de balayage,

d la densité de grains.

Exemple 1 :

$$\sigma_{N_n}/\bar{N}_t = 0,1 \text{ conduit à } d = 50 \lambda/lv\tau$$

Si $v=1$ m/s, $l=1$ m, $\tau=10$ s, on obtient :

$$d=5 \text{ grains/m}^2$$

Exemple 2 : Pour l'AMD, on a :

$$\bar{N}_n = 2 \sqrt{\bar{N}_f/2\tau}$$

dans le cas fréquent où l'on peut confondre $N_t + N_f$ avec $2 N_f$, on arrive à : $d=1/lv\tau$, soit $d=0,1$ grain/m² avec les valeurs précédentes de l , v et τ .

Ce type de raisonnement perd une grande partie de sa validité et de son intérêt lorsque la densité des grains devient très faible, car on passe alors du domaine de mesure de la valeur moyenne de l'activité à celui de la détection individuelle de grains, qui se traduit par des accidents isolés sur la courbe de l'enregistreur : ce dernier domaine est celui des grains très ac-

tifs, et *a fortiori* des galets que nous examinerons plus loin.

Pour poursuivre les mesures jusqu'à des densités très petites de grains, on devra prendre une sonde large et une grande constante de temps. Les compteurs de Geiger se prêtent mieux que les cristaux à la réalisation d'une sonde large; on peut aussi utiliser des cylindres allongés de plastiques scintillants, qui réunissent longueur et sensibilité: d'après Smith [12], un plastique de 25 cm de long et 5 cm de diamètre est aussi sensible qu'un cristal d'INA de 5 cm × 5 cm. On peut enfin utiliser plusieurs cristaux distants les uns des autres de quelques décimètres.

Le Service des Constructions Electriques du C.E.A. achève la réalisation d'une sonde en forme de delta contenant 5 compteurs à bismuth type 13 G 14, d'une largeur utile de 1 m.

Le choix de la constante de temps constitue un problème délicat dont la discussion nous entraînerait trop loin; ce choix sera souvent facilité par l'examen des mesures obtenues lors de la précédente détection.

Dans le cas d'une mesure point par point, la densité des grains devra être plus grande et dépasser souvent 100 grains/m²; ce type de mesure nécessite donc un nombre total de grains très élevé.

Les considérations précédentes permettent d'évaluer pour chaque problème l'activité spécifique qu'il serait en principe inutile de dépasser et qui dépend du détecteur, de la granulométrie et de l'étendue de la zone à étudier; il reste cependant incontestable qu'il y a toujours intérêt à partir d'une activité aussi grande que possible.

La surface totale que l'on peut marquer est inférieure au quotient de l'activité totale par l'AMD; dans le cas d'un gradient de concentration linéaire (répartition conique du sable actif), nous avons calculé qu'elle est au maximum égale aux 4/9 de ce quotient.

3° Cas particulier des galets.

La densité de répartition des galets étant toujours très faible, on procédera à une détection individuelle.

Il y aura toujours intérêt, mais spécialement dans le cas des galets immergés, à ce que l'activité totale dont on dispose soit répartie entre le plus grand nombre de galets possible. Nous examinerons le cas des galets immergés et des galets au sec.

a) GALETS IMMERGÉS :

Il y aura intérêt à balayer le fond avec une sonde aussi large que possible, l'eau limitant

l'efficacité de celle-ci à une distance de quelques décimètres.

Le signal pourra soit être envoyé à un ensemble intégrateur enregistreur de faible constante de temps (1 à 2 secondes), soit « écouté » directement à l'oreille.

Nous n'avons personnellement l'expérience que de ce dernier procédé, avec une sonde à compteur Geiger de 20 cm de longueur utile (compteur halogène type 3 G 3) tirée suivant son axe; nous estimons qu'avec ce détecteur tiré à une vitesse de l'ordre de 1 m/s, le signal doit être de l'ordre de dix fois le mouvement propre, ce qui, pour un galet marqué par 0,5 mC de Tantale 182, exige que la sonde en passe à 60 cm; autrement dit, la sonde a une largeur de balayage utile de 1,2 m.

Smith [12], qui a plus d'expérience que nous en la matière, est également plus optimiste; il considère qu'il suffit de doubler le mouvement propre en moins de 2 secondes. Pour un galet marqué par 30 μ C de Baryum 140 - Lanthane 140, il estime que, avec un compteur Geiger (sans doute le compteur G 60 H de la 20th Century Electronics, long de 60 cm), la largeur de balayage est de 95 cm à la vitesse de 1 m/s, et de 90 cm à celle de 1,5 m/s; avec un compteur à scintillation, 90 cm à 1 m/s et 80 cm à 1,5 m/s.

b) GALETS AU SEC :

Le signal produit par le galet diminue beaucoup moins vite avec la distance (inverse carré seulement); en conséquence, le galet est « vu » plus longtemps.

La détection peut se faire avec un appareil de prospection, le signal étant à la fois entendu à l'écouteur et lu sur l'aiguille de l'intégrateur; le scintillateur est ici préférable au Geiger.

Avec un détecteur SRAT type GMT 14 contenant 3 compteurs 3 G 3 (constante de temps 5 secondes) nous pouvons trouver un galet marqué par 0,5 mC de Ta 182 dans un rayon de 2 à 3 m en marchant à 1 m/s: le signal est égal au mouvement propre. En passant à l'aplomb, on peut trouver ce galet enterré à 25 cm de profondeur.

Smith estime qu'un galet marqué par 30 μ C de Ba+La est visible à 3 m au scintillateur et qu'une sonde à scintillation trainée à 1 m/s a une largeur de balayage de 50 cm pour ce galet enterré à 15 cm.

Il importe de noter que tous ces chiffres déterminés expérimentalement ne sont que des ordres de grandeur, valables pour des galets dont les dimensions sont comprises entre 5 et 20 cm (influence de l'absorption du rayonnement dans le galet lui-même).

4° Les qualités du matériel de détection.

Vu la difficulté des opérations à la mer, le ma-

tériel sera robuste; cette qualité, à notre avis, l'emporte sur la sensibilité.

Il sera, si possible, constitué d'éléments séparables de faibles dimensions, susceptibles d'être utilisés à bord de petites embarcations.

Il sera bon de disposer de deux ensembles de détection; un ensemble léger, genre portatif, pour la reconnaissance préliminaire du secteur étudié; un ensemble perfectionné pour l'expérience proprement dite.

L'intégrateur possédera une gamme suffisamment étendue de constantes de temps (1 à 15 secondes) et de sensibilité; un intégrateur logarith-

mique permettant d'explorer sans changer de gamme les zones de fort gradient est souhaitable.

L'enregistreur devrait être à réponse rapide, insensible au roulis et aux trépidations du navire, doté de plusieurs vitesses de déroulement; un enregistreur magnétique d'impulsions, insensible aux accélérations, restituerait l'information recueillie par la sonde sans les distorsions dues à la constante de temps et compléterait utilement l'intégrateur-enregistreur classique, surtout dans les zones de fort gradient.

Tout ce matériel devra pouvoir être alimenté par accumulateurs.

IV. — LA SÉCURITÉ

Nous distinguerons la sécurité des expérimentateurs et celle du grand public.

IV A) La sécurité des expérimentateurs.

Les opérations présentant le plus de risques sont la fabrication du sédiment actif et l'immersion. Ces opérations, pour être accomplies en toute sécurité, exigent une discipline sans relâche, du temps, et des moyens auxquels sont habitués les spécialistes des radio-isotopes.

Facile dans le cas de l'irradiation du verre broyé, la prévention des risques d'irradiation et de contamination sera plus difficile dans le cas du marquage en surface à partir d'une solution radioactive, et plus encore dans celui de la fonte d'un verre contenant un radio-isotope avec broyage ultérieur.

En France, nous envisageons l'immersion du verre actif à partir du container même de transport, supprimant ainsi les risques d'un transvasement à bord.

L'emploi de la paire Baryum 140-Lanthane 140, utilisée en Angleterre, présente de grands avantages du point de vue sécurité: le Baryum 140, émetteur β de 13 jours de période, engendre le Lanthane 140 de 40 h de période, émetteur γ dur. Le chargement de galets avec un Ba 140 frais est, de ce fait, grandement simplifié.

Notons que le transport de sources puissantes et volumineuses d'émetteurs γ durs exige des containers très lourds; il y aura parfois intérêt à en effectuer la préparation sur le lieu même de l'expérience, voire à bord du navire servant à l'immersion.

IV B) La sécurité du grand public.

I. — CAS DES SABLES RADIOACTIFS :

Le sédiment actif immergé ne présente aucun risque. Il peut arriver cependant qu'une partie

soit rejetée sur une plage fréquentée; dans ce cas, l'activité générale de la plage sera trop diluée pour constituer un danger; mais il peut arriver qu'un grain de sable reste attaché à la peau d'une personne pendant plusieurs jours: Putman et Smith [8, 12] estiment nécessaire de limiter à 0,1 μ C l'activité d'un grain individuel pour éviter tout risque d'érythème local.

Dans le cas de l'étude d'une plage proprement dite [5 bis], il conviendra de s'assurer que le public ne peut avoir accès à des zones où l'irradiation externe dépasse notablement les doses de tolérance. Le mieux sera d'effectuer l'expérience en dehors de la saison des bains. Il faudra tenir compte aussi des poussières actives disséminées par le vent.

II. — CAS DES GALETS RADIOACTIFS :

On devra limiter à une valeur raisonnable :

- 1° L'activité individuelle d'un galet qu'une personne pourrait emmener, bien que cette éventualité soit fort improbable;
- 2° La densité de répartition des galets sur le lieu de l'épandage.

Encore faudra-t-il tenir compte de la fréquence des visites du public au lieu d'épandage et sur les lieux où peuvent être rejetés les galets.

Smith [12] a limité à 20 μ C de Lanthane 140 l'activité des galets qu'il a utilisés.

Dans la vallée du Var (voir plus loin V C 2), en des lieux pratiquement déserts, nous n'avons pas hésité à mettre 0,5 mC de Tantale 182 par galet: pour une répartition régulière de 10 galets par mètre carré, la dose à 1 m du sol serait de 60 m r/8 h et la dose au pied, au contact d'un galet, de 200 m r/8 h; rappelons que la dose de tolérance quotidienne, pour une irradiation totale du corps, est de 60 m r.

V. — LES EXPÉRIENCES

V A) Les expériences anglaises.

I. — LES EXPÉRIENCES DE LA TAMISE [8, 9, 10] :

Elles avaient pour but de suivre l'évolution des vases de la Tamise en aval de Londres et plus précisément de savoir si ces vases peuvent être entraînées vers l'amont par la marée montante.

Dans une expérience préliminaire, effectuée en juillet 1954, on fit usage de 85 g de verre à 5 % d'oxyde de scandium; ce verre, broyé à un diamètre de 35 microns, fut irradié jusqu'à lui communiquer une activité de 4 curies en $Sc\ 46$. Comme seul la partie minérale de la

vase était marquée, le verre fut mélangé à 25 kg de sédiment naturel dans le récipient même servant à l'immersion, qui est reproduit sur la figure 15; l'ouverture de l'appareil sur le fond est réalisée par simple traction sur un câble, puis le matériau est entraîné par le courant.

Les mesures, point par point, furent effectuées en laissant dériver le bateau sous l'action du courant, le détecteur traînant sur le fond; pour des questions de robustesse, on utilisa des compteurs de Geiger (3 compteurs de type G 24 H).

Cinq jours après l'immersion, la radioactivité était sensible à 20 km en amont, mais aucune trace ne fut relevée en aval.

Cette expérience fut reprise en 1955 mais sur

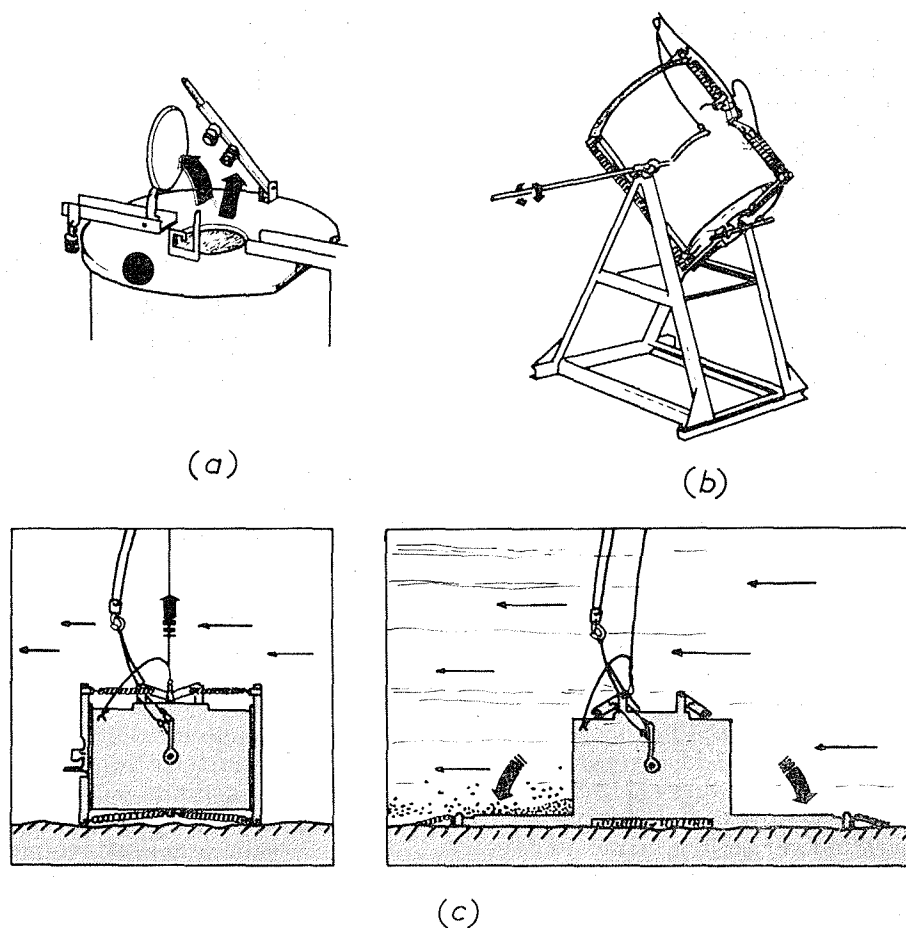


FIG. 15

Dispositif d'immersion utilisé dans les expériences de la Tamise.

- a) Introduction du traceur,
- b) Mélange du traceur et du sédiment naturel,
- c) Immersion.

une plus large échelle : 845 g de verre représentant 29 curies. L'activité fut retrouvée jusqu'à 24 km en amont et 15 km en aval.

Ces expériences, couronnées de succès, sont, par les distances étudiées et les activités mises en jeu, les plus importantes réalisées jusqu'ici; elles ont mis en évidence l'accumulation des vases fluides dans les chenaux où elles sédimement et se consolident.

II. — Une autre expérience eut lieu en mer [8], utilisant 2 curies de Sc 46 contenus dans 130 g de verre. Le détecteur consistait en 3 compteurs type G 60 H disposés parallèlement dans un tube étanche sur une sorte de traineau remorqué sur le fond (fig. 16).

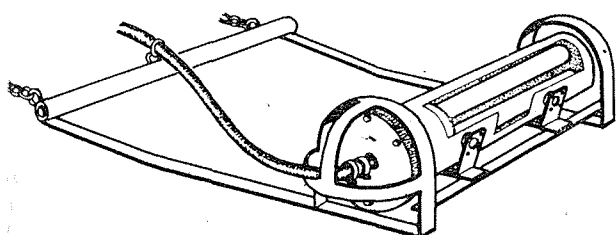


Fig. 16

Sonde sous-marine anglaise.

Traineau et détecteur étanche coupé à l'arrière pour montrer les trois compteurs de Geiger.

Le verre fut injecté dans un tube d'aluminium tenu verticalement au-dessus du fond. Au bout de 4 mois, il recouvrait une surface d'environ 4 hectares.

III. — ETUDES DE GALETS RADIOACTIFS :

Deux expériences ont été décrites.

Dans l'une [11, 11 bis], 1 200 galets furent percés et dans chacun on déposa un fragment de résine échangeuse contenant 15 μ C de Ba 140; les galets furent immergés à 500 m de la côte, par 5 m de fond. La détection se fit avec la sonde à 3 compteurs G 60 H décrite plus haut; on constata un mouvement des galets, sans qu'il y ait eu de vagues supérieures à 0,9 m.

Dans l'autre [12], 2 000 galets de 3 à 5 cm de diamètre furent marqués en surface avec 40 mC de Ba 140; en raison de la self-absorption, le rayonnement du La 140 en équilibre avec le Ba 140 provenant de ce tas de galets ne dépassait pas 40 mr/h à 1 m; l'immersion eut lieu au niveau de la mer, sur une grève; presque tous les galets furent retrouvés à l'aide d'une sonde à scintillation.

V B) Les expériences japonaises. [6, 7].

Le but de ces essais était de déterminer si la passe d'entrée du port en construction d'Hok-

kaïdo courait un risque quelconque d'ensablement.

On prépara 5 kg de verre marqué par 100 mC de Zinc 65 introduits avant fusion; ce verre fut ensuite broyé dans un dispositif automatique; la densité de ce verre avait été ajustée avec soin sur celle du quartz.

Le dispositif d'immersion était particulièrement simple; le matériau, à raison de 1,5 litre de volume apparent, fut, après mélange à un produit mouillant, placé dans un sac de polythène dont la base était maintenue ouverte par un anneau de plomb; la fermeture du sac était assurée par simple torsion (voir fig. 17).

La détection se fit point par point, soit avec

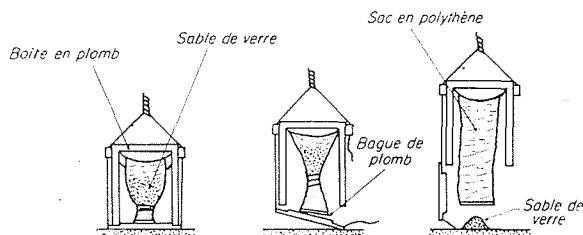


Fig. 17

Dispositif d'immersion utilisé au Japon.

1. Avant l'ouverture. — 2. Container à moitié ouvert.
3. Sable déchargé sur le fond de la mer.

un compteur à scintillation, soit avec un ensemble de compteurs Geiger.

Une première immersion eut lieu le 29 juin 1954 par 3 m de fond. Les mesures se poursuivirent jusqu'au 11 août.

D'autres essais furent entrepris notamment en mai 1955 par 6 m de fond [7].

Ces expériences ont permis de déterminer la profondeur à partir de laquelle les mouvements de sédiments deviennent négligeables, et de vérifier une relation établie par l'un des expérimentateurs entre le diamètre moyen des grains de sable et les vitesses orbitales de la houle sur le fond susceptibles de les déplacer.

V C) Les expériences françaises.

I. — L'EXPÉRIENCE DE CANNES [5, 5 bis] :

C'est la première expérience effectuée en France par le C.E.A. et le Centre de Recherches et d'Etudes océanographiques.

Elle avait pour but d'étudier l'évolution de la plage de la Bocca sous l'effet des vagues.

Vingt-cinq kilos de verre contenant 80 mC de Cr 51 furent fondus par la Compagnie de Saint-Gobain, puis broyés et tamisés; on récupéra 17 kg compris entre 0,8 et 0,2 mm.

Le Chrome 51 fut choisi pour trois raisons :

- 1) Sa vie courte (26 jours) assurait sa disparition avant la saison des bains;
- 2) Son rayonnement est peu ionisant, donc peu dangereux : 60 mr/8 h à 50 cm d'une source de 100 mC; et sa dose de tolérance dans l'air est élevée : 10 $\mu\text{C}/\text{m}^3$;
- 3) De ce fait, on put le transporter dans un fût blindé par 5 mm de plomb seulement.

Le 7 mars 1955, les 17 kg de verre furent répandus sur un rectangle de 30 m \times 1 m au niveau du déferlement (fig. 18). Bien que coloré en bleu, le verre disparut en quelques minutes

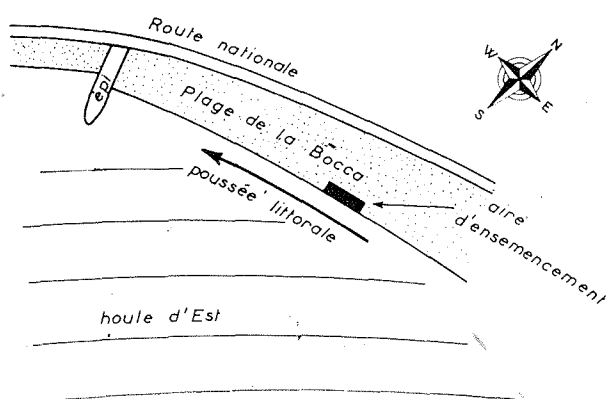


Fig. 18

Schéma de la plage de La Bocca.

On voit les dispositions respectives de l'aire d'ensemencement, de l'épi, et le sens de la poussée littorale par le vent d'est.

sous l'effet d'une houle légère en provenance de l'est, qui dura jusqu'au 11 mars. Du 11 au 13, eut lieu une tempête.

La détection se fit principalement au moyen d'un scintillateur portatif tenu à la main. La figure 19 donne les iso-actives brutes (mouvement propre de l'ordre de 120 c/s). On a pu déduire les conclusions suivantes.

- 1) Le cheminement se fait entre les lignes de niveaux 0 et 3 m.
- 2) Sous l'action de la houle d'est moyenne (vagues de 30 cm de hauteur), le déplacement a lieu en bloc vers l'ouest à une vitesse de 50 m/heure (notée entre les mesures 1 et 3).
- 2) Le déplacement intéresse principalement la pellicule superficielle, car dès que la tache de verre quitte un endroit, l'activité locale disparaît.
- 4) On a vérifié la théorie qui précise que seuls les grains supérieurs à un certain diamètre (200 μ en général) forment la plage émergée, la partie sous-marine étant constituée de grains plus fins. Tous les échantillons pré-

levés dans la partie immergée se révélèrent inactifs.

- 5) Après la tempête, on n'a plus retrouvé trace des grains radioactifs.

II. — LES ÉTUDES DE DÉPLACEMENT DE GALETS DU VAR.

Ces expériences, entreprises en novembre 1956 par le Laboratoire National d'Hydraulique, le C.E.A. et l'Arrondissement Spécial des Bases Aériennes des Alpes-Maritimes, avaient pour but d'étudier le charriage des galets par le Var, aux environs de Nice.

Dans les galets de diamètre compris entre 5 et 20 cm, on perça jusqu'au centre un trou de 8 mm de diamètre; on y introduisit, au moyen d'une pince recourbée à long manche, une aiguille de Tantale 182 de 5 mm de longueur, d'une activité de 0,5 mC; le trou fut ensuite rebouché au moyen d'un ciment expansif.

Huit cents galets ont été ainsi marqués; au cours des expériences, aucun expérimentateur n'a reçu de dose journalière supérieure à 30 milliroentgen.

Une première immersion a été faite dans le cours du Var, à une quarantaine de km en amont de l'embouchure : 280 galets ont été disposés à raison de 2 par mètre carré, principalement le long d'un massif en travers.

Une deuxième immersion a été faite sur la barre du Var : 500 galets ont été répartis à raison de 4 par mètre carré.

Enfin, 20 galets ont été répartis sur une longueur de 4 mètres au pied de la digue abritant le petit port de Cros-de-Cagnes.

Les dangers d'irradiation pour le grand public, tout à fait improbable en ces lieux déserts, ont été évoqués plus haut (IV B 2).

La prospection fut effectuée au moyen d'un gammamètre de prospection SRAT et d'une petite sonde (voir plus haut III C 3).

Les premiers résultats obtenus après une prospection rapide sont les suivants :

- 1° Après une faible crue, sur le cours du Var, 150 galets ont été emportés; on en a retrouvé 36 à des distances du point d'immersion variables entre 300 et 800 m; certains étaient enfoncés sous 2 à 3 couches de galets. La distance parcourue par les galets ne semble pas fonction de leur grosseur, mais de leur position initiale dans le profil.
- 2° Sur la barre, la houle s'est contentée de malaxer sur place le stock de matériaux existants.
- 3° Après une courte tempête, on a retrouvé, à l'entrée du port de Cros-de-Cagnes, 12 des 20 galets immergés le long de la digue.

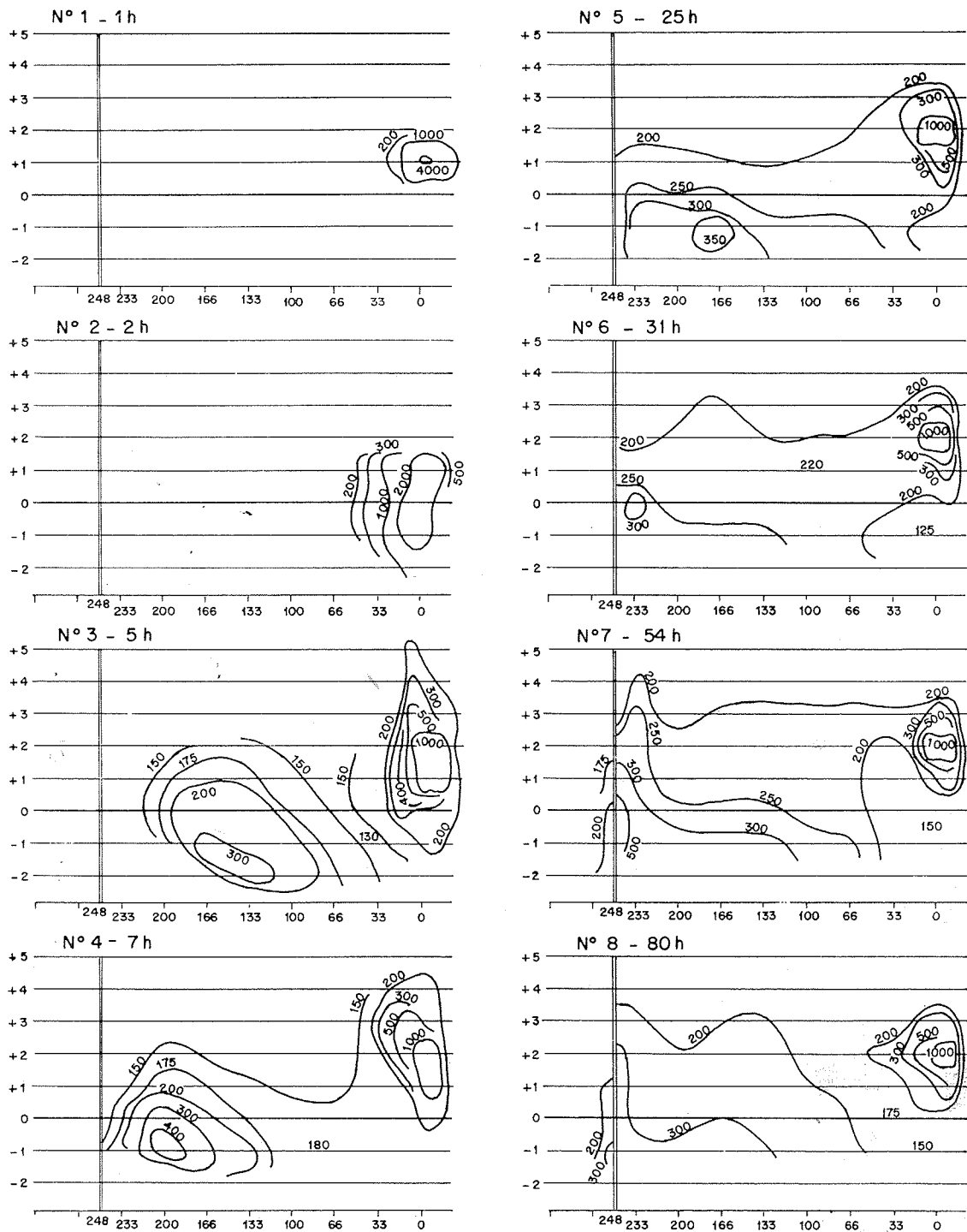


FIG. 19

Expériences de Cannes-La Bocca.

Courbes d'activité en choes-sondes, établies : pour la mesure n° 1, 1 heure après l'ensemencement ; n° 2 : 2 h ; n° 3 : 5 h ; n° 4 : 7 h ; n° 5 : 25 h, etc.

Notons que l'on avait simultanément colorié à la peinture cellulosique, appliquée sur place au pistolet, plusieurs milliers de galets.

Les deux méthodes se complètent : les galets

coloriés beaucoup plus nombreux sont souvent plus faciles à retrouver, mais leur recherche devient difficile dans les zones de déferlement, où l'eau est chargée de sable, ainsi que dans les eaux

froides ou profondes où les plongeurs ne vont pas volontiers. Enfin les seuls galets radioactifs peuvent être retrouvés s'ils sont enterrés.

III. -- LES EXPÉRIENCES DE BAYONNE. -- ÉTUDE DES MOUVEMENTS DES SABLES AU VOISINAGE DE L'EMBOUCHURE DE L'ADOUR.

L'Adour se jette à la mer dans le golfe de Gascogne sur une côte inhospitalière, soumise aux violentes actions des houles océaniques, et l'on observe, à l'embouchure, un phénomène de « barre », gênant pour la navigation, par les conditions d'agitation très dures qu'il crée à l'entrée et surtout par les faibles profondeurs qu'il entraîne et qui limitent le tonnage des navires fréquentant le port de Bayonne.

Le problème de l'amélioration des conditions d'accès au port de Bayonne fait actuellement l'objet d'une étude sur modèle réduit au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou. Pour réunir les éléments indispensables à l'étalonnage du modèle réduit, une série d'expériences de traceurs radioactifs a été entreprise par le Commissariat à l'Énergie Atomique et le Laboratoire National d'Hydraulique, en collaboration avec le Service Maritime des Ponts et Chaussées des Basses-Pyrénées. Ces expériences avaient

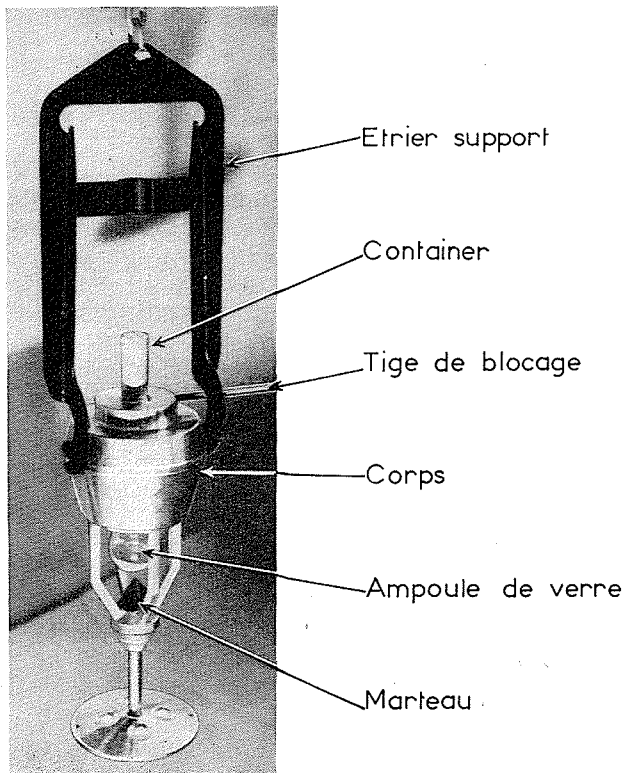


FIG. 20

Appareil d'immersion utilisé à Bayonne.

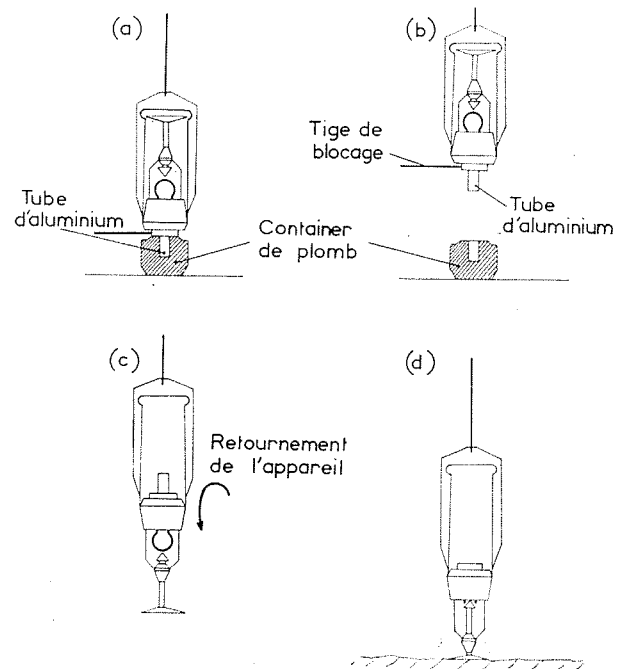


FIG. 21

Principe de fonctionnement de l'appareil d'immersion.

Expérience de Bayonne.

pour but d'analyser les mouvements de sable au voisinage de l'embouchure, en vue de leur reproduction sur le modèle réduit.

a) Caractéristiques du traceur :

Nous avons utilisé du verre à 1,14 % de Sc broyé et tamisé entre 0,1 et 0,3 mm.

Au total, une trentaine de tubes d'aluminium, contenant chacun environ 40 g de verre, ont été irradiés deux à trois semaines dans la pile de Saclay, ce qui a communiqué à chacun une activité de 200 à 300 mC en Scandium 46.

b) Dispositif d'immersion :

L'appareillage d'immersion utilisé dans ces expériences (fig. 20, 21, 22) permet l'immersion de 40 à 50 grammes de traceur. Celui-ci est libéré à une dizaine de centimètres du fond et se répand sur une surface inférieure à 1 m².

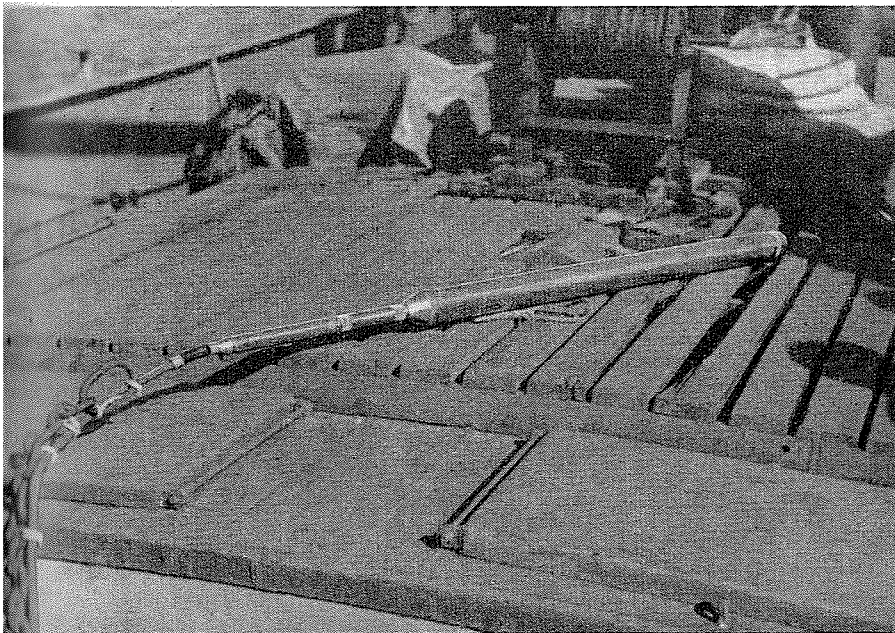
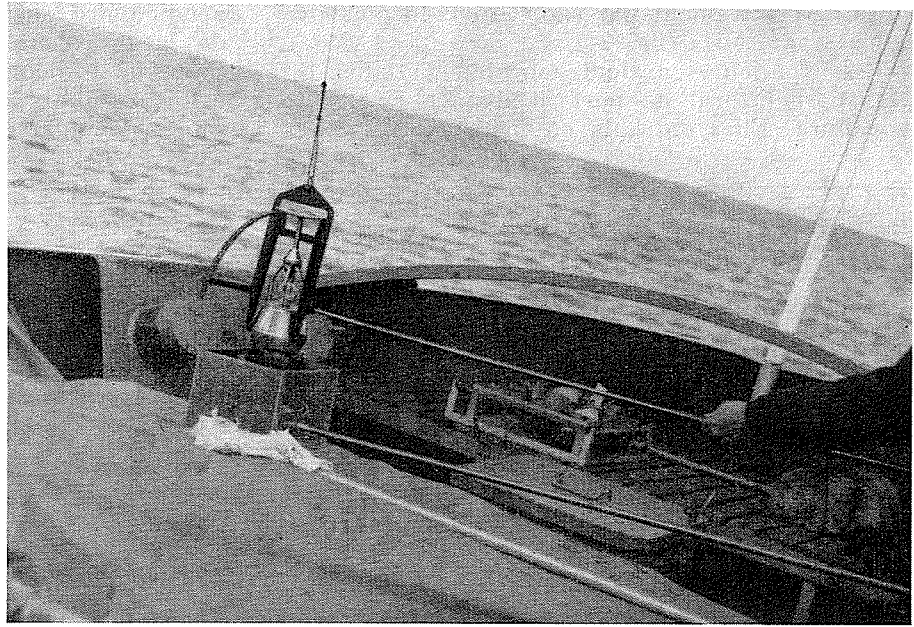
Le principe de fonctionnement de l'appareil est présenté sur la figure 21.

Il comporte essentiellement un dispositif à renversement qui transvase le traceur de son container dans une ampoule de verre et un marteau qui, par percussion sur le fond, vient briser l'ampoule et libérer le traceur.

Cet appareil sera perfectionné; le container même de transport servira à l'immersion, ce qui évitera un transvasement.

FIG. 22

La première phase d'une immersion à Bayonne.



Fg. 23

Sonde sous-marine contenant 8 compteurs Geiger-Müller utilisée à Bayonne.

L'extrémité du câble est alourdie au moyen d'une chaîne.

c) Appareillage de détection :

Nous avons utilisé un ensemble de détection prévu à l'origine pour la prospection de l'uranium et obligeamment adapté et mis à notre disposition par le Service des Constructions Electriques du C.E.A. La sonde (fig. 23) en acier inoxydable de 70 mm de diamètre de 3 mm d'épaisseur de paroi, auto-alimentée, contenait 8 compteurs halogènes type 3 G 3; elle était reliée par une quarantaine de mètres de câble à l'ensemble intégrateur enregistreur placé à bord du bateau remorqueur.

Le mouvement propre, sur le sable, était d'environ 8 c/s (1 c/s par compteur); la sensibilité d'environ 12 chocs nets/s pour $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$.

d) Première série d'expériences (février-mai 1956) :

Les premières immersions de traceur ont été effectuées sur des profils perpendiculaires à la côte, au nord et au sud de l'embouchure.

Les profils, situés à 1 400 m au nord et à 1 900 m au sud de l'embouchure, ont été mar-

qués respectivement par six et deux dépôts de sables radioactifs (fig. 24).

Ces expériences avaient pour but d'étudier le transport littoral de part et d'autre de l'embouchure. Elles ont mis en évidence :

pendiculaire au rivage, à proximité immédiate de la protubérance sableuse qui constitue la Barre de l'Adour.

Les résultats des trois premières détections sont présentés sur la figure 25; l'évolution des

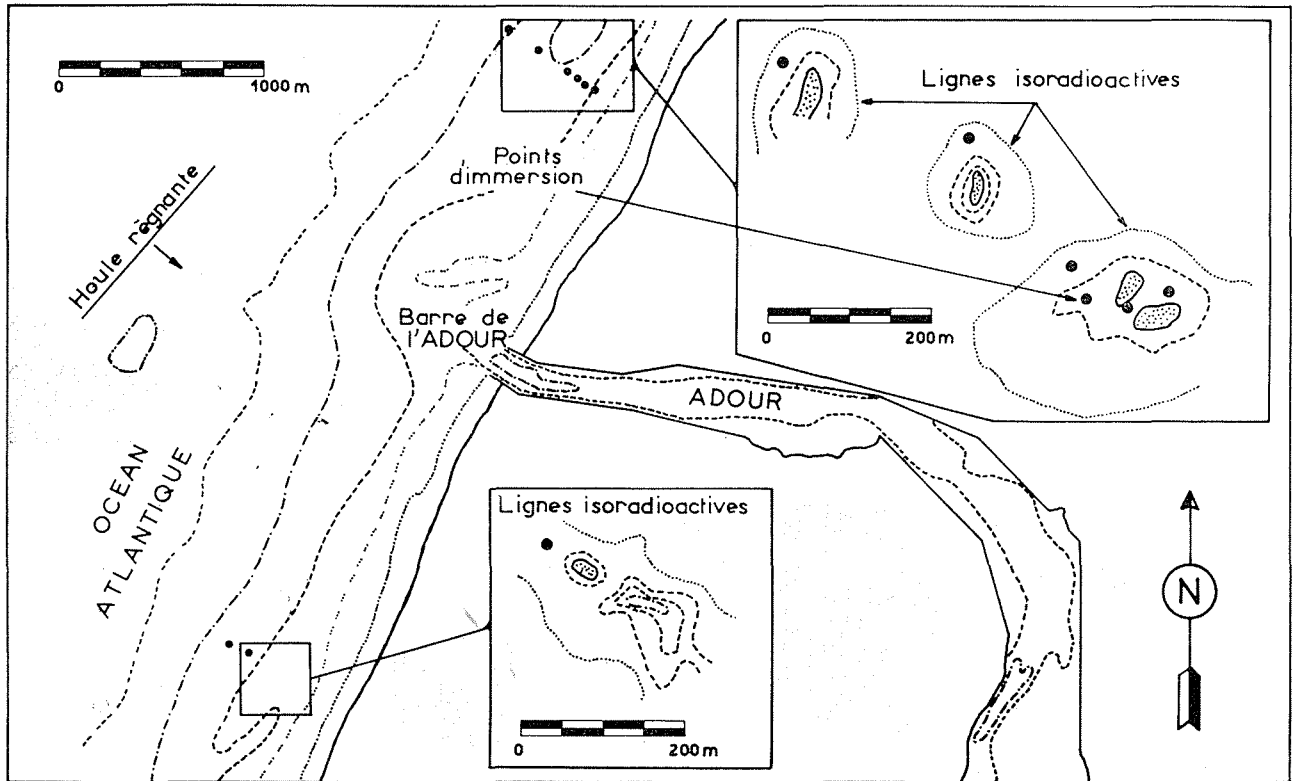


FIG. 24

Expériences de traceurs radio-actifs à l'embouchure de l'Adour.

- au nord, la composante nord-sud, parallèle au rivage, du déplacement des sables;
- au sud, l'action « frontale » de la houle qui tend à rejeter les sédiments vers le rivage.

Ces deux résultats, si sommaires qu'ils paraissent, sont extrêmement intéressants, car si l'existence d'un transport littoral, de direction nord-sud, au nord de l'embouchure, était prévisible par l'analyse des conditions d'attaque de la houle sur la côte nord, elle n'avait jamais été vérifiée par l'expérience. Au sud, par contre, la physionomie de la houle était trop complexe et trop mal connue pour qu'on puisse en tirer des conclusions valables.

e) *Deuxième série d'expériences*
(mai 1957) :

Au cours de ces expériences, cinq immersions de traceur ont été effectuées sur un profil per-

taches radioactives est mise en évidence par le tracé des lignes isoradioactives.

Elle montre :

- que sous l'action des faibles houles (détections n° 1 et 3), le sable se répartit sur le fond et tend à être rejeté au rivage;
- que par mer forte — houle de 5 m de creux maximum — (détection n° 2) le sable est au contraire transporté vers la Barre sous l'action combinée du courant littoral et du courant de jusant de l'embouchure.

Ces résultats ont, là aussi, confirmé en partie les hypothèses émises sur la formation de la Barre de l'Adour.

Les expériences n'ont sans doute pas donné tous les résultats espérés, mais il faut noter qu'ils constituaient les premiers essais effectués en mer dans des conditions d'agitation aussi dures, que l'appareillage utilisé était encore imparfaitement adapté aux conditions de travail

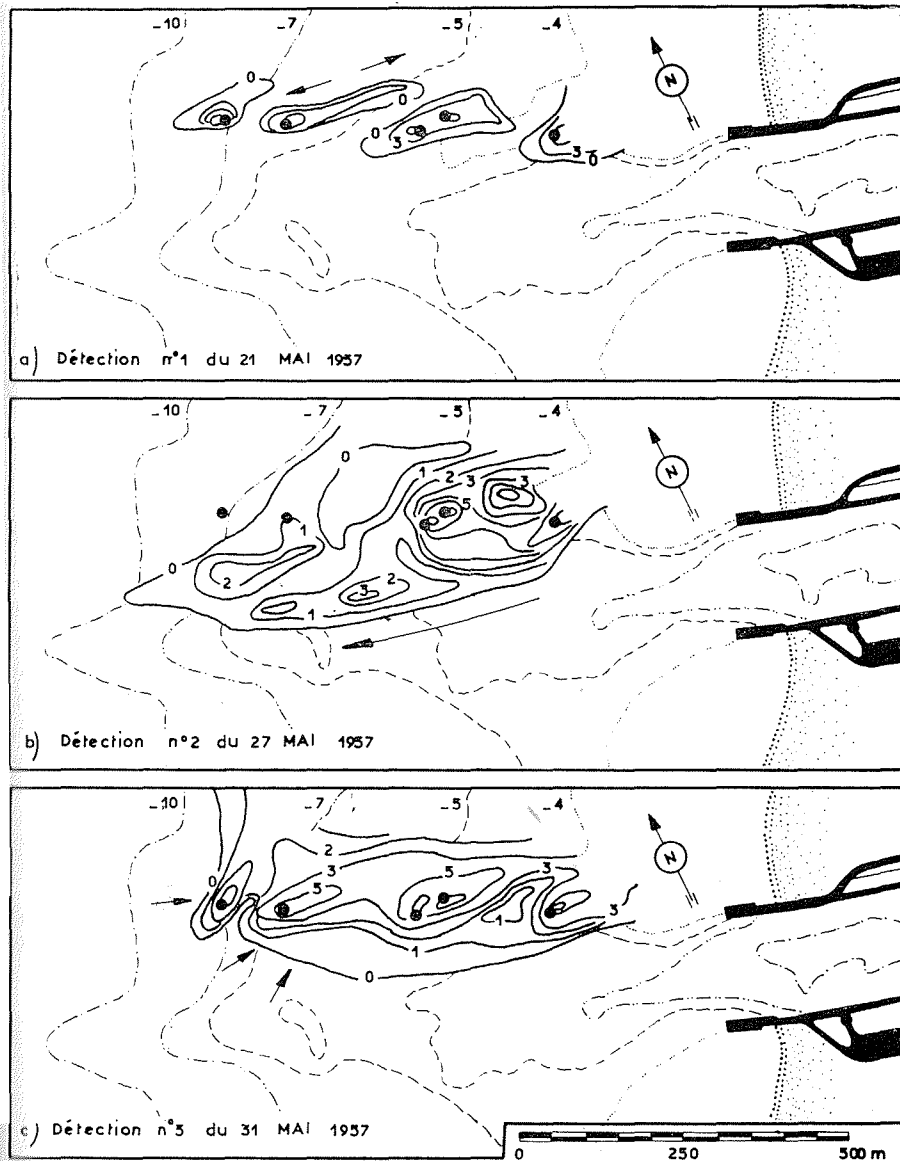


FIG. 25
Mouvements de sable
à l'embouchure de l'Adour.
Immersion du 20 mai 1957.

● Position des points
d'immersion du traceur.

à la mer, et que, pour l'ensemble du personnel qui a participé à l'exécution des expériences, il s'agissait de mettre au point une technique entièrement nouvelle.

Elles ont prouvé toutefois l'intérêt de la méthode des traceurs radioactifs dans l'étude des mouvements de sédiments et elles ont permis, à partir du matériel utilisé, de définir les caractéristiques d'un appareillage spécialement conçu pour les études en mer et de préciser les méthodes de travail à utiliser.

VD) Les expériences suédoises.

Les premières expériences effectuées en Suède en 1957, dont la relation [13] vient d'être publiée, ont mis en œuvre 36 kg de sable naturel marqués en Chrome 51 au taux de 10 mC/kg (cf. plus haut ID 3); la détection s'est faite au

moyen d'une sonde à scintillation reliée à un intégrateur portatif.

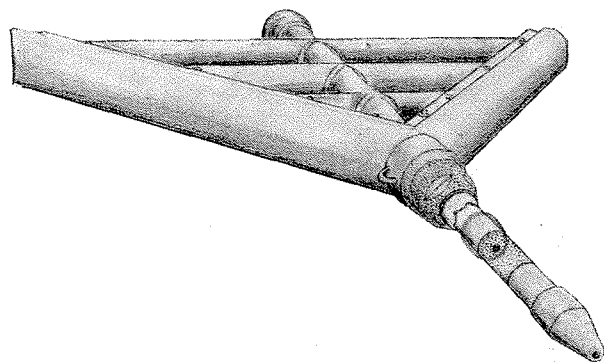


FIG. 26
Nouvelle sonde sous-marine
comportant cinq compteurs type GM 13, G 14.

CONCLUSIONS

Le nombre et la diversité des solutions déjà apportées aux problèmes qu'elle soulève montrent bien l'intérêt suscité par l'application des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements de sédiments.

Cette méthode est en plein développement, mais ses modalités d'application restent encore

à perfectionner. Ce n'est que grâce à une étroite collaboration entre hydrauliciens et spécialistes des radioéléments et après de nombreuses expériences sur le terrain, que l'on pourra disposer d'une méthode parfaitement au point, et véritablement irremplaçable.

Remerciements

En terminant, nous tenons à remercier le Centre de Recherche des Glaceries de la Compagnie de Saint-Gobain, et notamment MM. PEYCHES et LECLERC, pour la mise au point et la fabrication des verres spéciaux; M. LORIE, du C.N.R.S., qui nous a facilité l'approvisionnement en produits spéciaux à inclure au verre; la Direction des Recherches et Exploitations Minières du Commissariat à l'Energie Atomique, et notam-

ment MM. GADEIX et PRÊTRE, qui nous ont facilité le broyage du verre; le Service des Constructions Electriques du C.E.A., et notamment MM. LALLEMANT, GUITTON, SALIOU, qui ont étudié et réalisé le matériel de détection; MM. HAMON, GASNIER et BUZY, de la Section des Applications des Radioéléments, au C.E.A., qui ont participé activement aux mesures et réalisations exposées dans ce rapport.

ADDENDUM

Depuis la rédaction définitive du manuscrit (mars 1958), deux nouvelles expériences ont été décrites à la seconde Conférence Internationale sur les applications pacifiques de l'énergie atomique, qui s'est tenue à Genève en septembre 1958. En voici une brève analyse :

1. COMMUNICATION P/2357, DE D.L. INMAN ET T.K. CHAMBERLAIN.

" Experiments with radioactive sand as a tracer of beach sand movement. "

Il s'agit d'une première application de la méthode d'irradiation directe du sable naturel [1], décrite au paragraphe 1 C.

Sur une plage de Californie (Scripps Beach), on préleva du sable dont furent extraits 860 g de grains quartzeux contenant quelques centaines de p.p.m. de phosphore. Ces grains furent irradiés deux semaines à un flux de 10^{12} n/cm² × s, puis, après une semaine de « refroidissement », déposés sur le fond à 150 m au large, par une profondeur de 3 mètres.

Deux sortes d'échantillons furent prélevés par des plongeurs équipés de scaphandres autonomes.

a) 311 échantillons de surface, prélevés par appli-

cation, sur le fond, de cartons de 125 × 75 mm enduits de graisse, qui retenaient environ 100 000 grains.

b) 39 carottes prélevées au moyen de récipients cylindriques en plastique de 25 mm de diamètre, par 75 mm de profondeur.

L'analyse des cartons eut lieu par application directe sur un film radiographique. Quant aux carottes, elles étaient solidifiées par injection de résine synthétique, puis coupées en deux et appliquées sur le film. Le temps de pose le plus favorable, un mois après l'irradiation, était d'une douzaine d'heures.

Les mouvements du sable ont pu être suivis pendant 24 heures seulement, en raison de la grande vitesse de dispersion : 1 mille carré en 24 heures; on a constaté des vitesses de déplacement de 45 cm/mn, et retrouvé des grains actifs jusqu'à 2 cm de profondeur.

2. COMMUNICATION P/1820, DE A. GIBERT, S. CORDEIRO et alt.

" Tracing sand movement under sea with radioactive silver ¹¹⁰Ag. "

Quatre tonnes de sable marquées par 800 mC d'ar-

gent 110 ont permis d'étudier le cheminement du sable sous-marin dans la région littorale entourant le port de Figueira da Foz, sur la côte occidentale portugaise.

Les mesures ont eu lieu directement d'abord au moyen d'une sonde portative (sensibilité de l'ordre de $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$), puis à partir de prélèvements de quel-

ques dizaines de kg d'où l'argent était chimiquement extrait (sensibilité : $1 \text{ m} \mu\text{C}/100 \text{ kg}$, environ cent fois plus grande que dans la mesure directe).

Une zone longue de 16 km s'étalant sur environ 20 km^2 a été explorée; on a constaté une vitesse de déplacement du sable de l'ordre de 500 mètres par jour.

TABLEAU I. — Caractéristiques de différents isotopes utilisables

Elément	Période	Activité spécifique en mC/g obtenue en une semaine dans un flux de $10^{11} \text{ n}/\text{cm}^2/\text{s}$	Rayonnement γ en MeV (% par désintégration)	Rayonnement β en MeV	Prix approximatif du gramme à irradier en francs 1958
Cobalt 60	5,3 ans	1,8	1,17 (100 %) + 1,33 (100 %)	0,3	
Argent 110	270 j	0,32	0,17 à 1,52	0,53 (35 %)	
Zinc 65	250 j	0,1	1,11 (45 %)	β + 0,32 (2 %)	
Tantale 182	111 j	6,9	$\sim 100 \% > 1 \text{ MeV}$	0,51	70 (oxyde)
Scandium 46	85 j	39	0,89 (100 %) + 1,12 (100 %)	0,36 ($\sim 100 \%$)	4.500 (oxyde)
Iridium 192	74 j	175	forte majorité, 0,3	0,67 (85 %)	1.500
Antimoine 124	60 j	0,95	0,21 à 2,1	0,28 à 2,39, dont 0,63 (56 %) 2,39 (22 %)	
Chrome 51	28 j	2,1	0,32 (8 %)	néant	
Rubidium 86	19,5 j	1,9	1,08 (9 %)	1,77 (91 %)	quelques milliers
Phosphore 32	14 j	2,5	néant	1,71 (100 %)	
Baryum 140	13 j	produit de fission	0,3 à 2,6 dont 95 % de 1,6	0,4 à 2	
Lanthane 140					
Ba 140 \rightarrow La 140					
Or 198	2,7 j	650	0,41 (98 %)	0,96 (98 %)	500

TABLEAU II (d'après D.B. Smith [12]). — Dépôt d'activité en surface par trempage

Elément	Masse adsorbée par gramme de sable	Activité spécifique par gramme de sable après une semaine d'irradiation à $10^{12} \text{ n}/\text{cm}^2/\text{seconde}$.
Iridium	8 μg	15 $\mu\text{C}/\text{g}$ (Ir 192)
Argent	7 μg	0,02 $\mu\text{C}/\text{g}$ (Ag 110)
Cobalt	150 μg	3,3 $\mu\text{C}/\text{g}$
Baryum-Lanthane	Produit de fission	60 $\mu\text{C}/\text{g}$ (activité totale à saturation)
Ba-La sur « sable vert »	»	750 $\mu\text{C}/\text{g}$ (activité totale à saturation)

TABLEAU III

Réponse expérimentale de différents détecteurs immergés à une couche superficielle de 1 microcurie/m² d'Ir 192 et Sc 46

	Epaisseur enveloppe	Mouvement propre chocs/seconde	Taux comptage net chocs/seconde Ir 192	Taux comptage net chocs/seconde Sc 46
Compteur Geiger halogène type 3 G 3.....	1 ¹⁰⁰ / _m laiton	1,3	0,77	2
	1 ¹⁰⁰ / _m laiton + 1 ¹⁰⁰ / _m inox. . .	1,3	0,66	1,73
	1 ¹⁰⁰ / _m laiton + 2,5 ¹⁰⁰ / _m inox.	1,2	0,52	1,55
Compteur Geiger bismuth type 13 G 14....	1 ¹⁰⁰ / _m laiton	4,2	12,5	12,8
	1 ¹⁰⁰ / _m laiton + 1 ¹⁰⁰ / _m inox. . .	3,7	10,76	11,85
	1 ¹⁰⁰ / _m laiton + 2,5 ¹⁰⁰ / _m inox.	3,3	9,4	10,8
Cristal INa (TI) de 1" 3/4 × 2" : (seuil 60 keV).....	2 ¹⁰⁰ / _m acier	47	155	202

N.B. — Ces mouvements propres ont été mesurés au laboratoire; dans la nature, ils seront en général plus faibles.

BIBLIOGRAPHIE

- GOLDBERG (E. D.), INMAN (D. L.). — « Neutron irradiated quartz as a tracer of sand movements. » *Bulletin of Geological Society of America*. Vol. 66, May 1955, pp. 611-613.
- GIBERT (A.). — « Essai sur la possibilité d'employer ¹¹⁰Ag dans l'étude du transport du sable par la mer. » *Ministerio das Obras Publicas. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil*. Publication n° 63, Coimbra, 1955; et *Gazeta de Fisica* (janvier 1955).
- GIBERT (A.), VASCONCELOS PINHEIRO (J. F.). — « Marcacao de areias com prata radioactiva et sua identificacao em amestras empobreciadas na razao de 1/10^e. » *Bol. da Ordem das Engenharia*. Vol. IV, février 1955.
- 3 bis* S. DA CONCEICAO CORDEIRO. — « Promenorizacao sobre os ensaios em grande escala, do estudo do movimento das areias do mar utilizando Ag 110. » *Comunicacao do Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 1^a Reuniao de tecnicos portugueses de energia nuclear*. Lisbonne, janvier 1958.
- FOREST (G.). — « Observations du charriage littoral au moyen d'éléments radioactifs. » *Journal de la Marine Marchande*, numéro spécial, « Nouveautés Techniques Maritimes » 1957, pp. 223-229.
- HOURS (R.), NESTEROFF (W. D.), ROMANOVSKY (V.). — « Utilisation d'un traceur radioactif dans l'étude de l'évolution d'une plage. » *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Tome 240, pp. 1798-1799, 2 mai 1955.
- 5 bis*. HOURS (R.), NESTEROFF (W. D.), ROMANOVSKY (V.). — « Méthode d'étude de l'évolution des plages par traceurs radioactifs. » *Travaux du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques*. Vol. 1, n° 11, novembre 1955.
- INOSE (S.), SHIRIASHI (H.). — « The measurement of littoral Drift by radio isotopes. » *The Dock and Harbour Authority*. Vol. XXXVI, n° 434, January 1956, pp. 284-288.
- Conférence de Genève (mêmes auteurs que l'article précédent). — « The field experiment of littoral drift using radioactive glass sand. » 1955, 8 P/1053, Première Conférence de Genève sur les applications pacifiques de l'énergie atomique.
- PUTMAN (J. L.), SMITH (D. B.). — « Radioactive tracers techniques for sand and silt movements under water. » *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Pergamon Press, London. Vol. n° 1, July 1956, pp. 24-32.
- Hydraulics Research Station (Wallingford). — « Radioactive Tracers in the Thames Estuary. » HRS/PLA Paper 20, 1956.
- PUTMAN (J. L.), SMITH (D. B.), WELLS (H. M.), ALLEN (F.), ROWAN (G.). — « Thames siltation investigation. Preliminary experiments on the use of radioactive tracers for indicating mud movements. » *A.E.R.E. I/R 1576* Harwell, December, 1954.
- KIDSON (D.), SMITH (D. B.), STEERS (J. A.). — « Drift Experiments with Radioactive Pebbles. » *Nature*. Vol. 178, n° 4527, August 1956, p. 257.

- 11 bis. STEERS (J. A.), SMITH (D. B.). — « Detection of movement of pebbles on the seafloor by radioactive methods. »
Geographical J. Vol. 122, part 3, september 1956.
12. SMITH (D. B.), EAKINS (J. D.). — « Radioactive methods for labelling and tracing sand and pebbles in investigations of littoral drift. »
International conference on radioisotopes in scientific research, UNESCO/NS/RIC/63, Paris, septembre 1957.
13. JAN DAVIDSON. — « Investigations of sand movements using radioactive sand. »
Svensk Geografisk Arsbok, 33, Lund, 1957.
14. ARLMAN (J. J.), SANTEMA (P.), SVASEK (J. N.). — « Movement of bottom sediments in coastal waters by currents and waves; measurement with the aid of radioactive tracers in the Netherlands. »
Progress Report, June 1957 Issued by *Delta-dienst Rijkswaterstaat*; Ministry of Transport and Waterstaat, The Netherlands.
15. SIEVERT (R.). — *Acta Radiologica*. Vol. I, 89, 1921, pp. 124-126.
16. FOREST (G.), JAFFRY (P.). — « Emploi des traceurs radioactifs dans l'étude des mouvements de sédiments sous l'effet de la houle et des courants. »
Congrès de l'Ass. Int. Rech. Hyd., Lisbonne, 1957.
17. GERMAIN (J.), FOREST (G.), JAFFRY (P.). — « Utilisation des traceurs radioactifs pour l'étude des mouvements de sédiments marins. »
6th Conference on Coastal Engineering, Gainsville (U.S.A.), décembre 1957.

