

CHAPTER 42

EMPLOI DES TRACEURS RADIOACTIFS POUR ETUDIER L'EVOLUTION D'UN NUAGE DE VASE DANS UN ESTUAIRE

par

René BONNEFILLE¹, Marcel HEUZEL² et Léopold PERNECKER³

I - INTRODUCTION

Dans le chenal d'accès de la Gironde, le Port Autonome de Bordeaux effectue continuellement des dragages pour assurer la navigation dans l'estuaire. La rentabilité de ces travaux dépend de la distance du lieu de dragage et de l'emplacement du dépôt.

Sur la demande du Port Autonome de Bordeaux, le Laboratoire National d'Hydraulique a effectué avec le Commissariat à l'Energie Atomique, Section des Applications des Radioéléments, une campagne de traceurs radioactifs dans l'estuaire de la Gironde (figure 1) dans le but d'étudier le cheminement des produits de dragage lâchés à partir des puits d'une drague. Le nuage radioactif ainsi formé fut ensuite suivi à l'aide de bateaux munis d'appareillage de détection.

La campagne de mesure a montré que :

- la plus grande partie des sédiments lâchés par la drague est mise en suspension et se déplace avec le courant,
- après le lâcher des produits de dragages, la concentration moyenne de l'estuaire ne croît que très peu,
- la décantation des sédiments rejetée ne peut avoir lieu que pendant un temps court au moment des étiages de courant,
- la décantation s'effectue sur une surface très grande.

Site de l'expérience de traceurs radioactifs

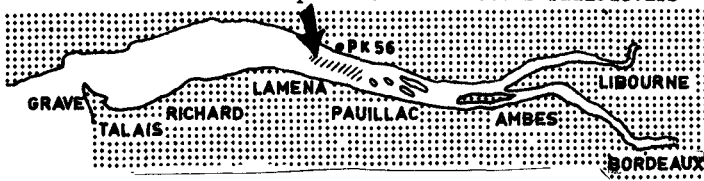


Fig. 1. Estuaire de la Gironde

1. Ingénieur, Chef de la Division Hydraulique Maritime du Laboratoire National d'Hydraulique, Centre de Recherche et d'Essais de Chatou - FRANCE.
2. Ingénieur au Centre de Recherche et d'Essais de Chatou - FRANCE.
3. Ingénieur au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou - FRANCE.

II - APPAREILLAGE ET METHODES D'EMPLOI DE TRACEURS RADIOACTIFS

a) - Les mesures préliminaires

Préalablement à toute étude de mouvement des sédiments par la méthode de traceurs radioactifs, il est nécessaire de connaître la valeur du bruit de fond dans la zone d'expérience. Les mesures furent effectuées au moyen de sondes à scintillations classiques (SPP.3 des Ets S.R.A.T.), en "dynamique" avec contrôle intermédiaire en "statique", le seuil d'intégration étant réglé sur 50 keV et la constante d'intégration en mesure dynamique sur 1,2 s.

Le bruit de fond du lit variait de 10 et 90 cps; les mesures statiques dans la couche d'eau comprise entre 1 m au-dessous de la surface et 1 m au-dessus du fond, effectuées sur des verticales en plusieurs points et à divers instants de la marée pour déterminer l'activité ambiante de la masse liquide, ont fait apparaître des valeurs maximales de 1,5 à 3 cps. Les valeurs minimales de l'activité introduite pendant l'expérience seront 4 cps pour la suspension et 100 cps sur le fond.

b) - Le marquage des sédiments

De nombreux prélèvements ont été effectués dans les puits de la drague: à la sortie des rampes de remplissage en surface et à diverses profondeurs dans le chargement. Tous ces échantillons furent analysés au Laboratoire de Chimie de la Section Applications des Radioéléments au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. La granulométrie obtenue par des procédés différents, varie entre 5 μ et 100 μ (figure 2), la densité moyenne sèche est $\rho_s = 2,58 \text{ g/cm}^3$.

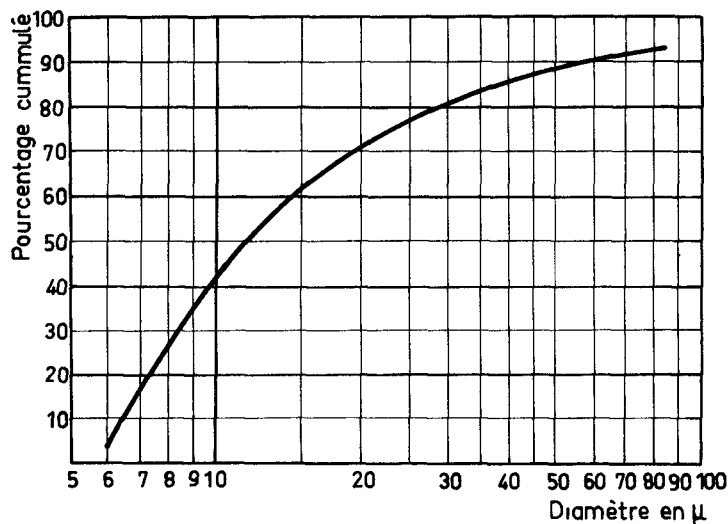
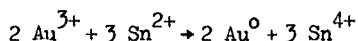


Fig. 2. Courbe granulométrique de la vase.

Le traceur était de l'or ^{198}Au émetteur γ d'énergie de rayonnement 410 keV et de période 2,7 jours. Le procédé habituel de marquage massif n'étant pas applicable, il fut remplacé par un marquage superficiel suivant la méthode utilisée par Petersen (1).

Le procédé, étudié par la Section d'Application des Radioéléments du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, consiste à traiter préalablement la vase au chlorure stanneux dont on utilise ensuite les propriétés réductrices pour déposer l'or sous forme métallique suivant la réaction



La solution d'or radioactif est du chlorure d'or. Pour des concentrations de vase de l'ordre de 60 g/l, la fixation de l'or est quasi complète pour des quantités d'or inférieures à $5 \cdot 10^{-3}$ mg par mg de vase. Le poids de vase à traiter et marquer est déterminé pour que la totalité de l'activité contenue dans chaque injection, soit entièrement fixée. Le procédé est valable pour les particules de diamètre compris entre 5 et 19 μ .

c) - L'appareil d'injection

Le marquage de la vase et son injection dans les puits de la drague ont nécessité la mise au point d'un appareillage dont le principe de fonctionnement est donné par la figure 3.

L'ensemble comporte un récipient avec couvercle à blocage, essayé à la pression de 5 kg/cm², dans lequel on introduit lavase, préalablement traitée à l'étain, et diluée à la concentration voulue (60 g/l). Par un jeu de vannes, commandées à distance, on effectue ensuite les opérations suivantes:

- admission d'air sous faible pression pour assurer un mélange homogène,
- transfert à distance de la solution radioactive de son flacon de transport dans le récipient, par un dispositif à dépression,
- agitation d'environ 1/2 heure par bullage d'air comprimé pour assurer la fixation,
- injection dans les puits de la drague, à la profondeur désirée, par chasses d'eau et pression d'air,
- lavage des conduits et du récipient pour décontamination.

Pendant ces opérations le personnel est protégé par un écran biologique en briques de plomb.

III - LES MESURES DE L'ACTIVITE EN SUSPENSION

Cinq bateaux des Services du Port Autonome de Bordeaux furent mis à notre disposition, pour mettre en évidence la forme et la vitesse de déplacement du nuage en mesurant simultanément l'activité en suspension. Les positions des bateaux, relevées individuellement au cercle hydrographique, étaient obtenues en coordonnant les mesures par radio, au moyen d'un dispositif automatique émettant des tops à intervalles réguliers. Un repère de temps et la profondeur d'immersion de la sonde étaient marqués au même

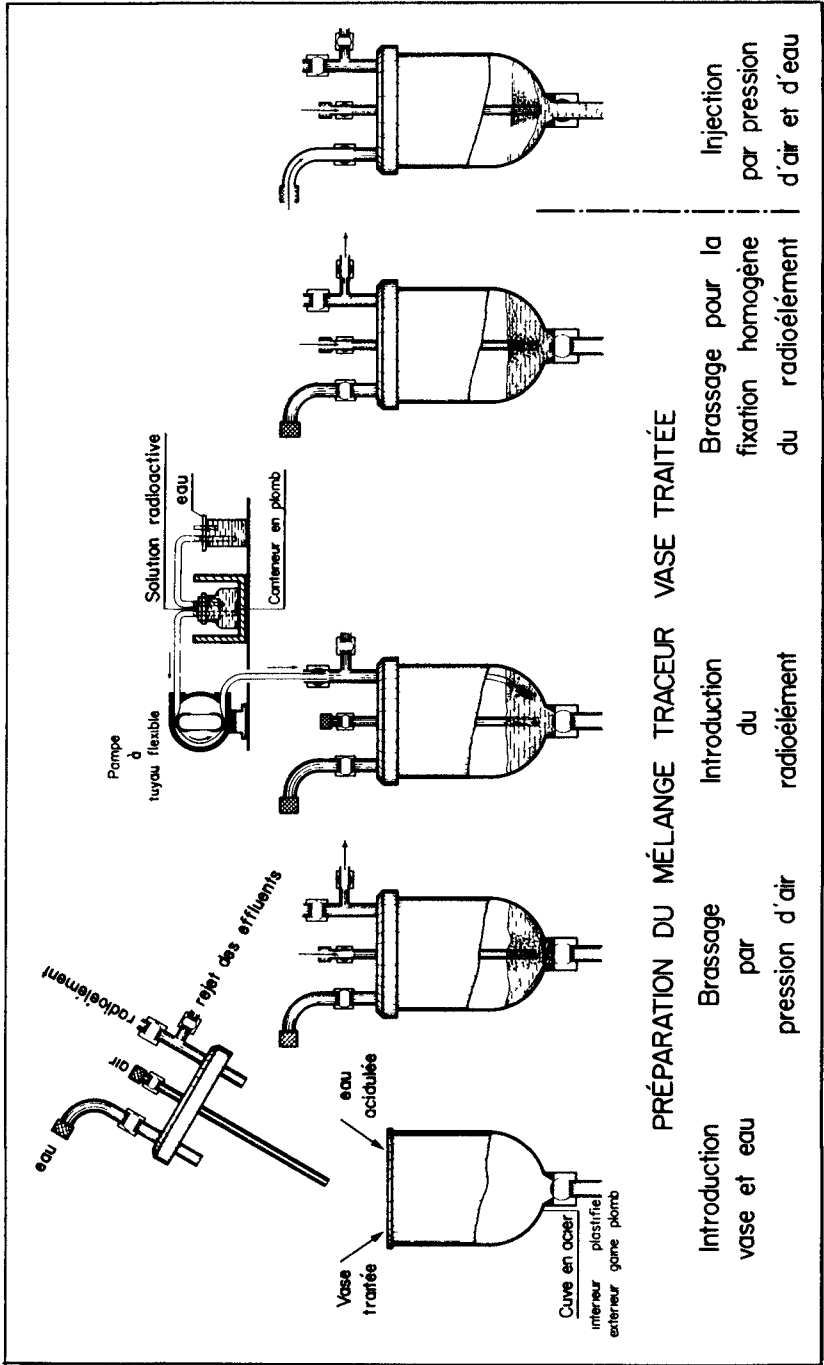


Fig. 3. Dispositif permettant la préparation de la vase marquée et son injection.

instant sur les enregistrements.

L'étalonnage en laboratoire des appareils, dont la gamme la moins sensible correspondait à 15 000 ou 10 000 cps, a donné 13 cps pour une activité de $1 \mu\text{Ci}$ par m^3 d'eau.

L'expérience eut lieu le 28 mai 1964 par courant de flot de marée de coefficient 75. Une solution de 405 mg de Cl^{198}Au d'une activité totale de 5,4 Ci fut fixée sur 772,5 g de vase traitée. L'injection fut faite à une profondeur de 2 m dans le chargement de la drague. Au moment du vidage, soit environ 2 heures après la basse-mer locale, la hauteur d'eau dans la zone de rejet était 6,80 m pour un tirant d'eau en charge de la drague de 4 m environ. La détection du nuage fut poursuivie pendant 3 heures.

IV - INTERPRETATION DES MESURES

a) - Le transport des sédiments en suspension

Les particules sont transportées en suspension, lorsque les forces hydrodynamiques sont suffisantes pour les soulever hors du lit et les entraîner dans le sens de l'écoulement turbulent. Les particules tombent ensuite par gravité et il en résulte un gradient de concentration sur la verticale. Dans le cas d'un écoulement stationnaire et turbulent, le transport descendant est en équilibre avec le transport ascendant proportionnel à l'échange turbulent dans le fluide. Expriment cet équilibre entre le flux de matière vers le fond et le flux de matière vers le haut par une équation différentielle, Rouse (2) a donné la solution :

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{d-z}{z} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^Z$$

avec :

$$Z = \frac{W}{\beta \kappa u_*}$$

Si $\kappa = 0,4$, $\beta = 1$, pour u_* donné, plus W est petit, plus la distribution des sédiments sur une verticale est uniforme; plus les particules sont grosses, c'est-à-dire plus W est grand, plus la concentration décroît dans les couches supérieures de l'écoulement. Pour une dimension donnée des grains, plus u_* est grand, plus la distribution des sédiments tend à être uniforme. Expriment la loi de vitesse de chute sous la forme (Pernecker et Vollmers(3))

$$v_* = \left(\frac{D \cdot g}{v} \right)^{1/3} \quad D = 2,52 \left(\frac{W D}{v} \right)^{1/3}$$

pour $\frac{W D}{v} < 1$, on trouve pour Z la relation

$$Z = \frac{D_*^3}{10 \kappa R_*}$$

ce qui permet, connaissant R_* et D_* , de préciser la façon dont s'effectue le transport des sédiments dans l'écoulement.

Le calcul du courant, dans la partie de la Gironde où l'expérience eut lieu, fut effectué à partir des courbes de marée, enregistrées le jour de la

détection et utilisées comme conditions aux limites du calcul. Les équations de Saint Venant ont permis de déterminer la profondeur d , la vitesse moyenne V et la vitesse de cisaillement u_* . La figure 4 donne :

$$R_* = \frac{u_* D}{v}$$

pour différentes sections, en supposant $D = 15 \mu$ et $v = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Le calcul de Z (figure 5) montre que la plupart du temps les sédiments lâchés par la drague sont en suspension et ne décantent que pendant une courte période.

b) - Etude de la concentration des sédiments marqués en suspension

Le réseau d'informations obtenues au cours de la détection permet de connaître l'activité radioactive en divers points et à chaque instant, soit par lecture directe soit par interpolation. A cette activité correspond une concentration relative de la masse de vase rejetée puisque le marquage est supposé homogène. Le comptage des chocs par unité de temps donne directement la concentration relative en activité, c'est-à-dire :

$$C'(x,y,z,t) = \frac{\text{nombre de } \mu\text{Ci}/\text{m}^3 \text{ d'eau}}{\text{nombre de } \mu\text{Ci injectés}}$$

et indirectement la concentration relative en masse :

$$C = \frac{\text{grammes de vase}/\text{m}^3 \text{ d'eau}}{\text{grammes de vase rejetés}}$$

Le seuil de détection se situant à 5 cps, les mesures ne sont plus possibles lorsque la concentration est inférieure à $0,385 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ correspondant à une concentration en vase de l'ordre de 10^{-4} (l'activité initiale était de 5,4 Ci pour 1 500 t).

La figure 6 représente l'évolution de l'activité en suspension pendant trois heures. L'enveloppe 10 cps a une allure assez allongée, ce qui laisse supposer que le transport des sédiments par transfert convectif et diffusion turbulente horizontale est prédominant et que la diffusion et la convection transversale sont peu importantes. Le tableau I donne les superficies des zones isoactives, ou d'égale concentration, et les dimensions du nuage à divers instants.

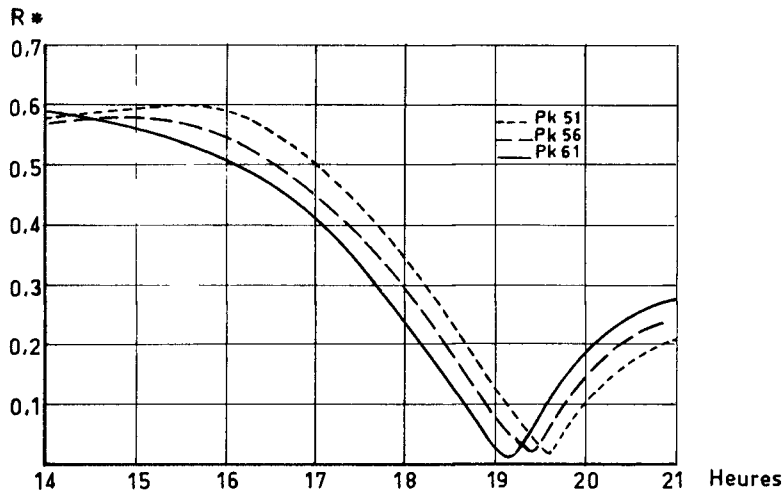


Fig. 4. Variation de R^* en fonction du temps aux Pk 51,56 et 61.

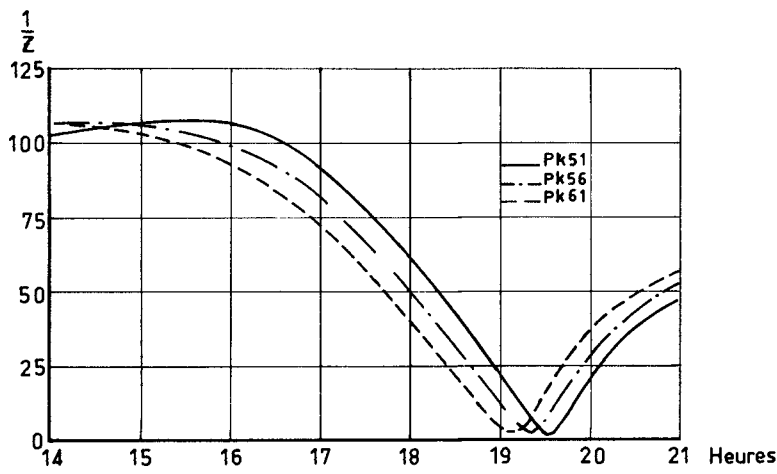


Fig. 5. Variation de $\frac{1}{Z}$ en fonction du temps aux Pk 51,56 et 61.

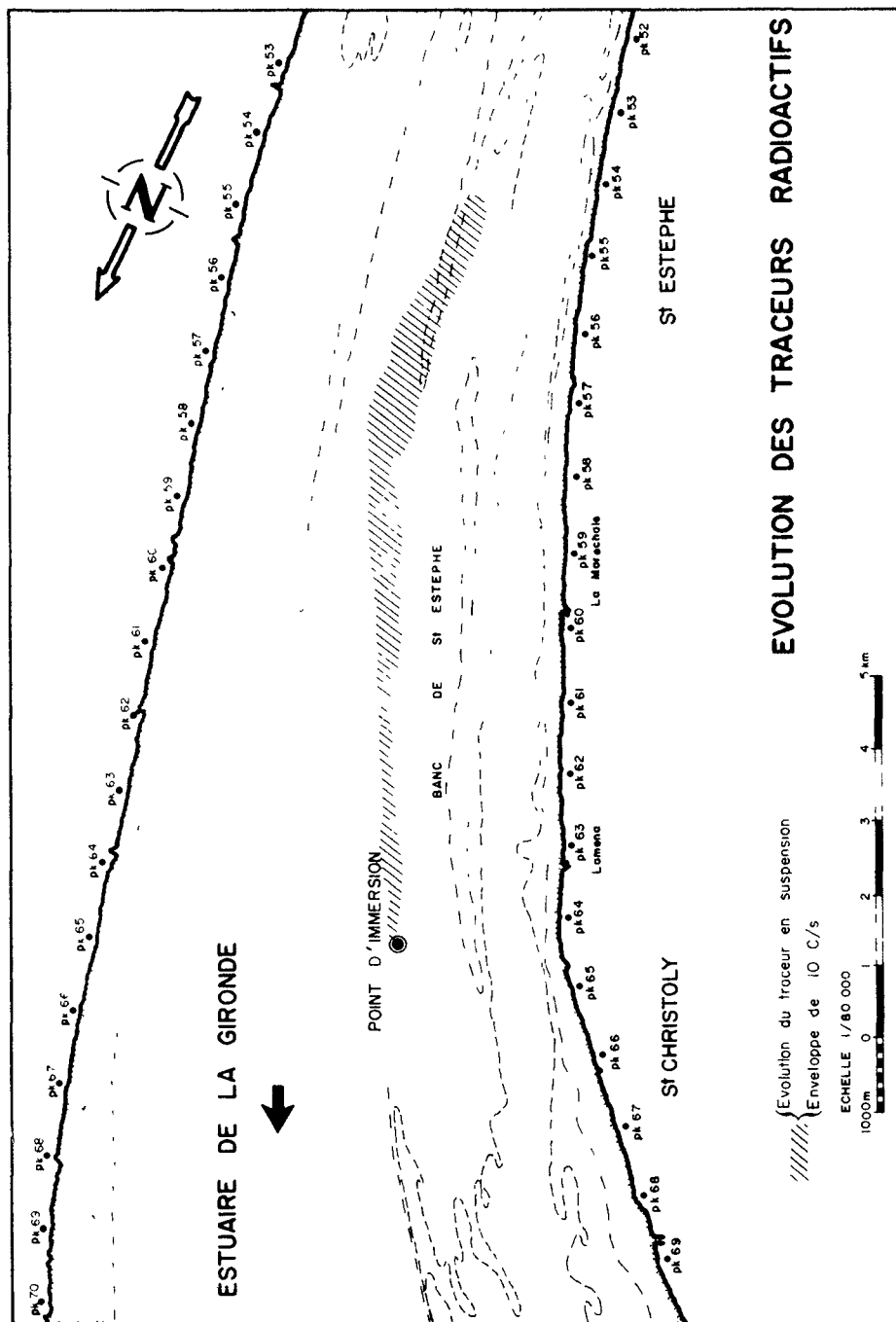


Fig. 6. Site de l'expérience.

T A B L E A U I

SURFACES ISOACTIVES ET DIMENSIONS LONGITUDINALES ET TRANSVERSALES
DU NUAGE DETECTABLE EN FONCTION DU TEMPS APRES L'IMMERSION

Temps en mn		15	30	45	60	75	90	105	120
5 cps	S(m ²)	4,1.10 ⁵	8,2.10 ⁵	4,6.10 ⁶	6,4.10 ⁵	4,8.10 ⁵	7,1.10 ⁵	10,5.10 ⁵	7,4.10 ⁵
	L(km)	1,53	2,65	1,90	2,11	1,02	1,93	2,37	1,93
	l(m)	470	750	420	430	370	460	480	560
10 cps	S(m ²)	2,2.10 ⁵	6,1.10 ⁵	2,6.10 ⁵	2,6.10 ⁵	2,9.10 ⁵	3,4.10 ⁵	5,0.10 ⁵	1,9.10 ⁵
20 cps	S(m ²)	1,5.10 ⁵	4,3.10 ⁵	1,7.10 ⁵	1,7.10 ⁵	2,0.10 ⁵	1,5.10 ⁵	3,0.10 ⁵	4,0.10 ⁴
50 cps	S(m ²)	6,0.10 ⁴	1,0.10 ⁵	1,1.10 ⁵	7,8.10 ⁴	8,0.10 ⁴	3,7.10 ⁴	2,1.10 ⁴	
100 cps	S(m ²)	4,0.10 ⁴	4,4.10 ⁴	4,0.10 ⁴	4,4.10 ⁴	2,0.10 ⁴	3,1.10 ³	3,1.10 ³	
300 cps	S(m ²)	1,0.10 ⁴	5,3.10 ³	2,2.10 ³	9,3.10 ³				

En fin d'expérience la tache s'agrandit moins vite; ceci est peut être dû :

- soit à la baisse du flot, donc à la diminution de la convection et de l'intensité de la diffusion turbulente,
- soit à un étalement des sédiments marqués en suspension dans le domaine non détectable inférieur à 5 cps,
- soit à la décantation, ce qui est peu probable car celle-ci n'est possible que pendant une époque courte et ultérieure.

Le tableau I montre que 120 mn après l'immersion le sédiment marqué détectable (5 cps) occupe un volume de $6,5.10^6 \text{ m}^3$ en admettant la profondeur égale à 9 m. En supposant que la drague ait lâché 1 500 tonnes de matériaux, la concentration moyenne serait de $2,2.10^{-4}$, donc faible par rapport à la concentration moyenne de l'estuaire (10^{-3}). Même en admettant que la plus grande partie des sédiments marqués soit contenue dans le volume correspondant à 20 cps ($3,6.10^5 \text{ m}^3$ pour 9 m de profondeur), la concentration moyenne ne serait que 4.10^3 . On peut donc en conclure que même dans le cas le plus défavorable, où tous les matériaux déposés par la drague sont entraînés en suspension, l'augmentation de concentration qui en résulte est faible ou du même ordre de grandeur que la concentration habituelle de l'estuaire.

V - ETUDE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION TURBULENTE DANS L'ESTUAIRE

A partir des résultats, présentés ci-dessus, nous avons essayé d'évaluer l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion longitudinale. En rai-

son de la forme allongée de la tâche, nous avons négligé la convection et la diffusion latérales. L'équation de diffusion s'écrit dans ce cas :

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -V \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + d \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right)$$

En supposant K_x constant et en posant $Y = \bar{c}d$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -V \frac{\partial Y}{\partial x} + K_x \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2}$$

la solution est :

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi K_x t}} e^{-\frac{(x-Vt)^2}{4K_x t}}$$

Y_0 correspondant à la valeur initiale de Y à la source ponctuelle et instantanée.

Connaissant la quantité injectée Y_0 , la quantité Y mesurée en fonction du lieu x et du temps de diffusion t (en 354 points), et la vitesse moyenne V calculée par ailleurs, nous avons effectué le calcul du coefficient de diffusion K_x en fonction du temps après l'immersion (figure 8). On remarque que K_x varie proportionnellement à t^2 ; on peut supposer que le coefficient de diffusion s'exprime par la relation :

$$K_x = c_1 \epsilon t^2$$

où ϵ est l'énergie dissipée par unité de masse, donnée en écoulement permanent par l'expression

$$\epsilon = Vgi$$

Le calcul de ϵ en fonction du temps pour différents lieux dans la Gironde (figure 7) montre que ϵ ne varie guère en fonction de l'espace.

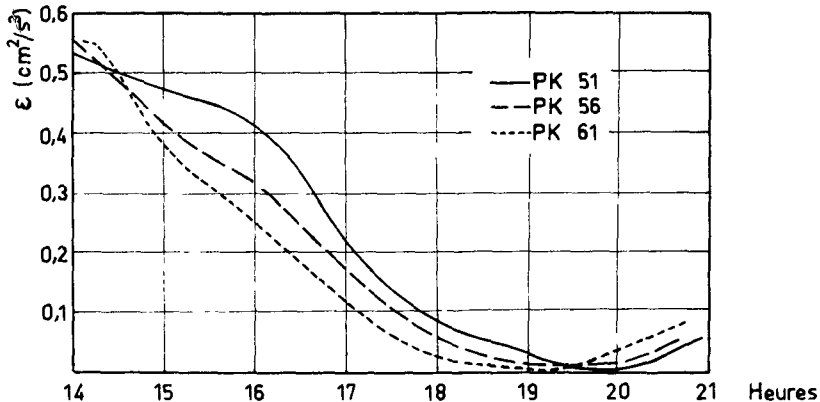


Fig. 7. Variation de ϵ en fonction du lieu et du temps.

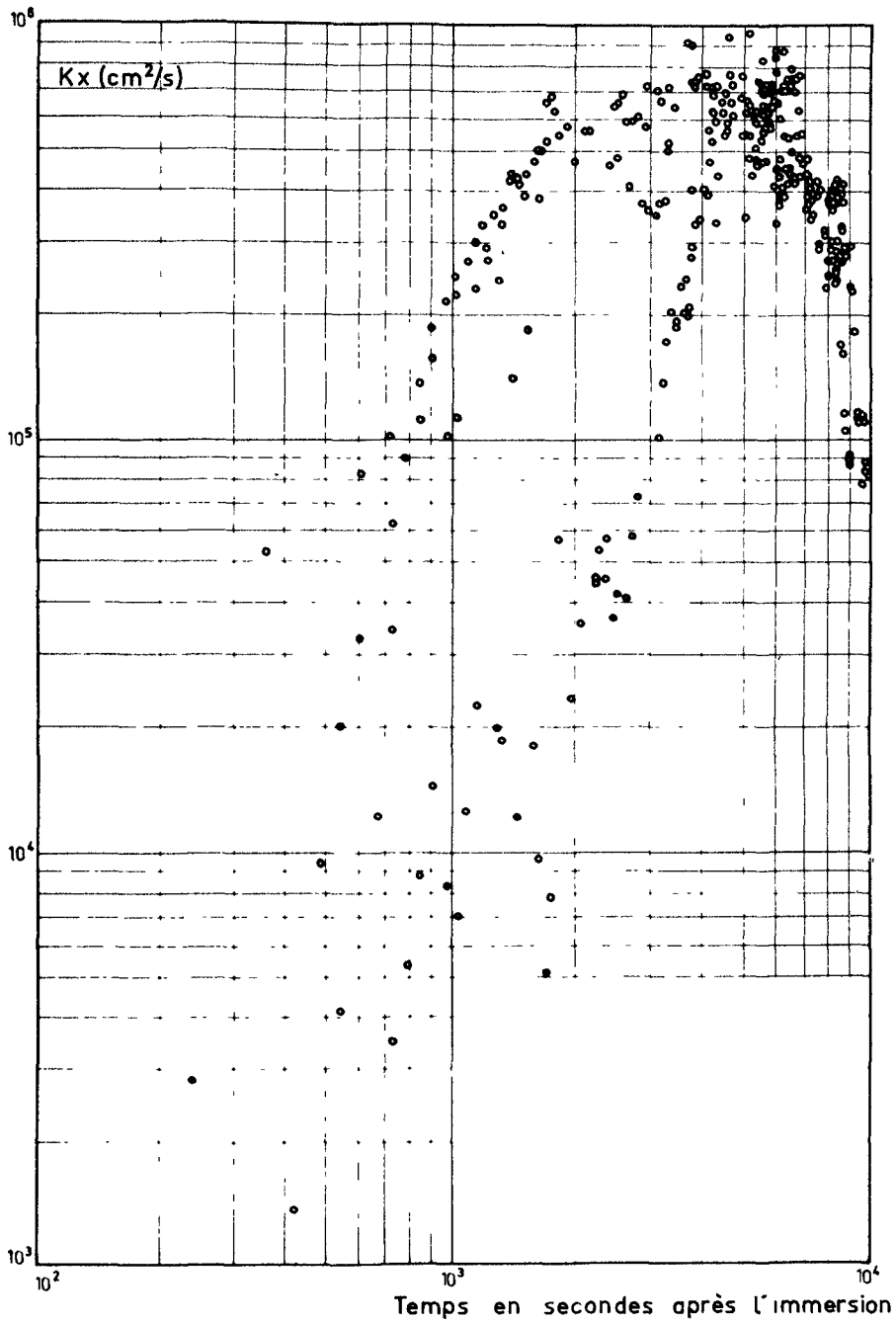


Fig. 8. Resultats du calcul du coefficient de diffusion longitudinal.

Le tracé de la variation de K_x en fonction de et^2 (figure 9) conduit à une dispersion des points expérimentaux très grande, cependant, en moyenne on peut estimer :

$$c_1 = 8.10^{-3}$$

Nous avons également essayé d'évaluer le coefficient de diffusion latéral K_y . En supposant la répartition de concentration gaussienne dans le plan vertical perpendiculaire à la trajectoire du centre de gravité, la largeur l du nuage contenant 95 % de la substance diffusée est reliée à la variance σ de cette répartition par :

$$l = 4\sigma$$

L'hypothèse de Taylor consiste à admettre que la variance et le coefficient de diffusion transversale K_y sont reliés de la façon suivante :

$$\sigma^2 = 2 K_y t$$

d'où :

$$K_y = \frac{l^2}{32 t}$$

La largeur du nuage étant déterminée à partir des observations (voir tableau I), on trouve en moyenne $K_y = 3,2.10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ (voir tableau II)

T A B L E A U II

CALCUL DU COEFFICIENT DE DIFFUSION LATÉRALE

t(s)	9.10^2	$1,8.10^3$	$2,7.10^3$	$3,6.10^3$	$4,5.10^3$	$5,4.10^3$	$6,3.10^3$	$7,2.10^3$
l(m)	472	750	420	430	370	460	480	560
$K_y(\text{cm}^2/\text{s})$	$7,8.10^4$	$9,8.10^4$	$2,1.10^4$	$1,6.10^4$	$9,5.10^3$	$1,3.10^4$	$1,1.10^4$	$1,4.10^4$

VI - CALCUL DE REPARTITION DE LA CONCENTRATION DES SEDIMENTS LÂCHÉS EN GIRONDE

La résolution numérique de l'équation de diffusion

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -v \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Y}{\partial y} \right)$$

transformée en une équation aux différences finies, avec $K_x = 8.10^{-3} \text{ et}^2$ et $K_y = 3,2.10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ a conduit aux résultats de la figure 10. Le nuage calculé se déplace en avance sur le nuage mesuré.

Dans l'hypothèse où tous les sédiments restent en suspension on peut également calculer la répartition des sédiments lâchés dans l'estuaire. Partant d'un chargement de la drague égal à 1500 t et de $K_x = 8.10^{-3} \text{ et}^2$, $K_y = 3,2.10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$, le même programme de calcul que ci-dessus permet de déterminer la concentration en fonction de l'espace et du temps de diffusion après l'immersion. La figure 11 présente les résultats; 15 mn après

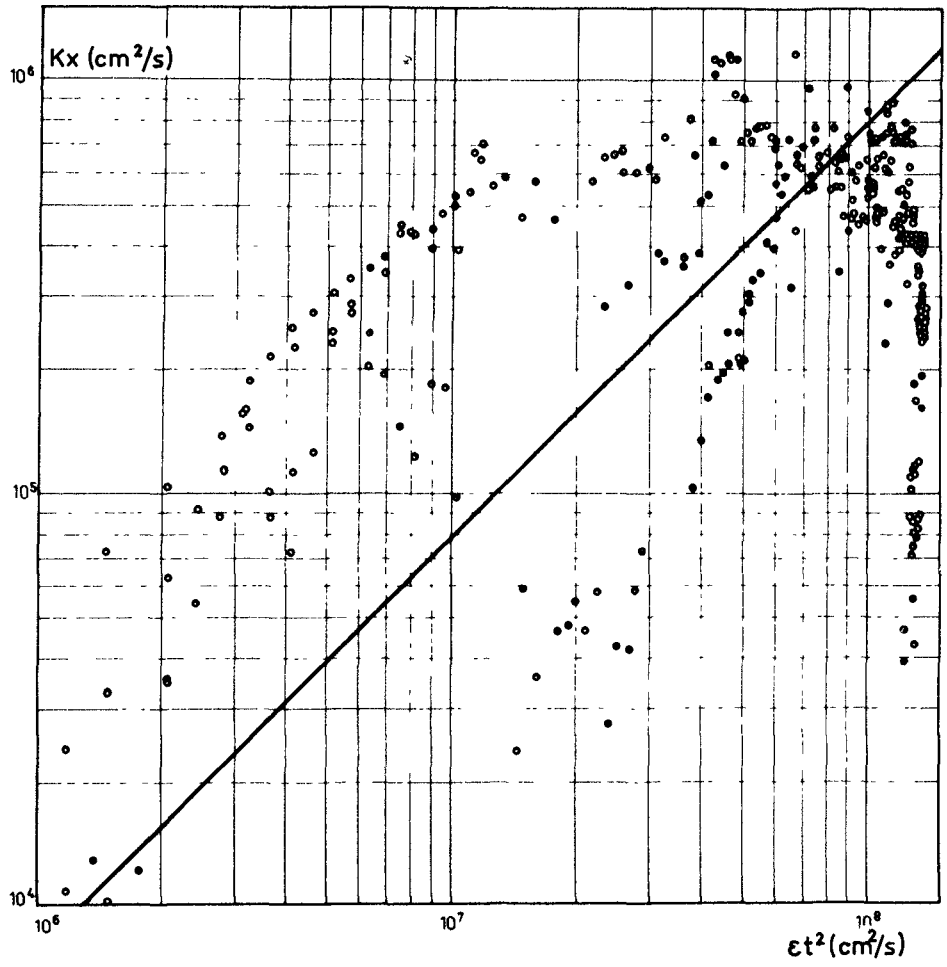


Fig. 9. Etude de Kx en fonction de ϵt^2 .

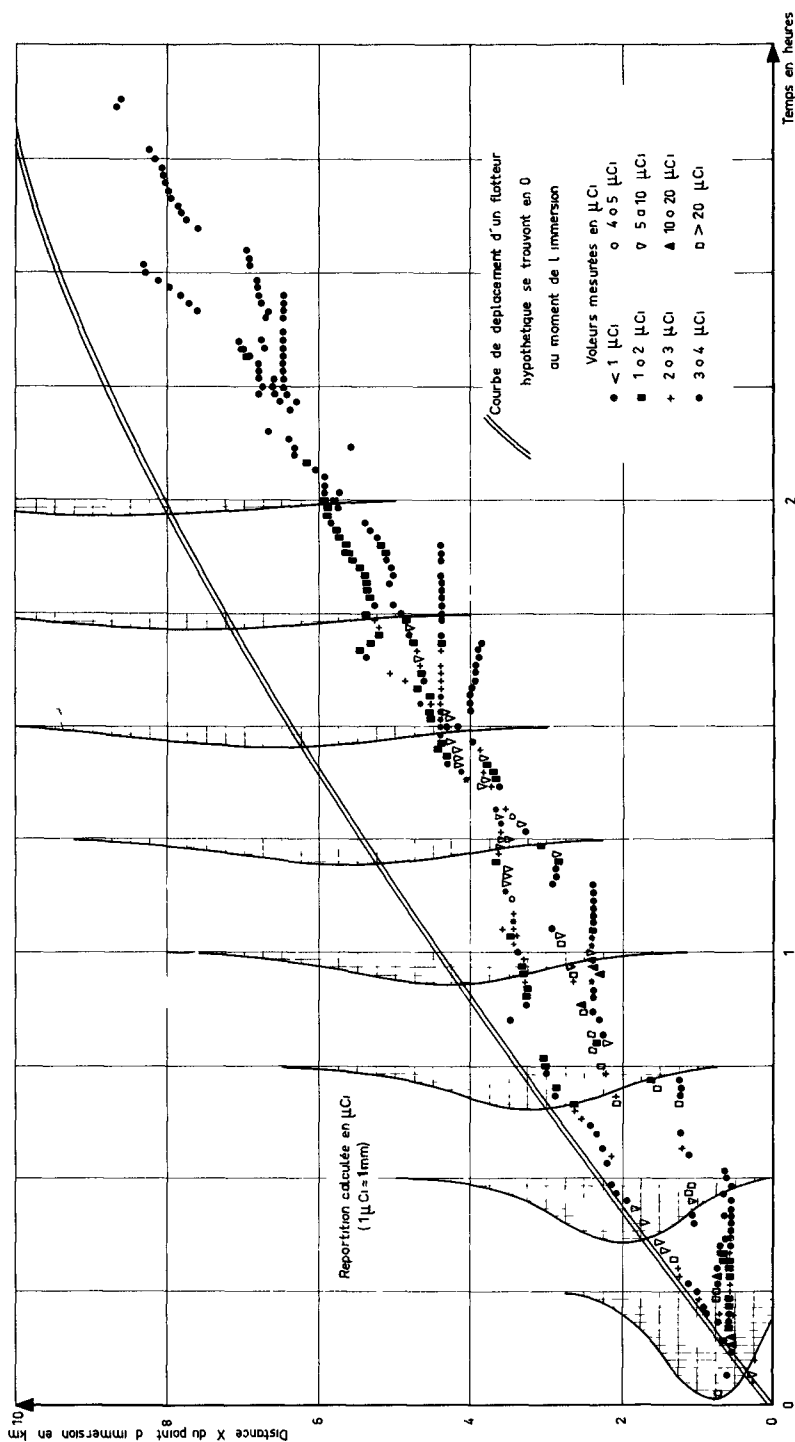


Fig. 10. Évolution mesurée et calculée de l'activité en suspension en gironde le 28 Mai 1964.

l'injection, la concentration des sédiments est de l'ordre de 10^{-3} , c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la concentration moyenne de l'estuaire; 2 heures après l'immersion la concentration n'est que 10^{-4} , donc faible vis-à-vis de la concentration moyenne.

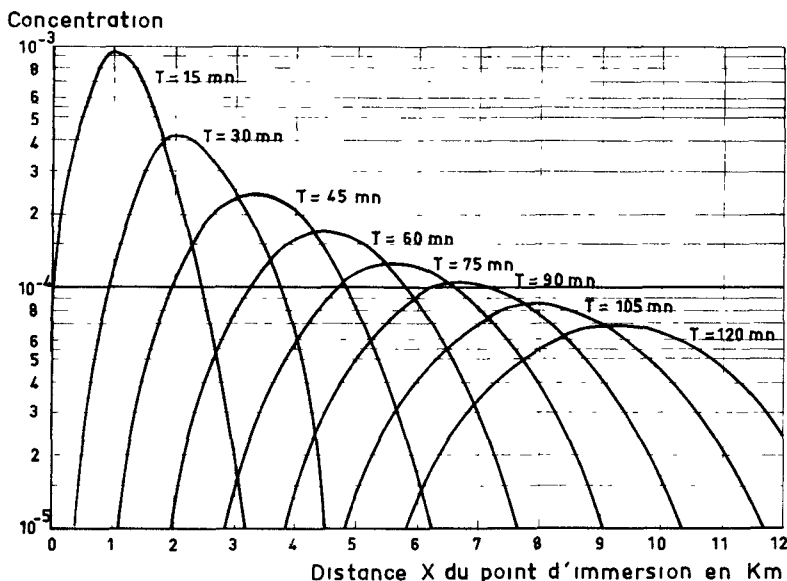


Fig. 11. Evolution de la concentration des sédiments lâchés en Gironde le 28 mai 1964.

VII - CONCLUSION

En Gironde, dans le chenal d'accès au port de Bordeaux, se produisent des dépôts vaseux intermittents, qui gênent la navigation et qui sont régulièrement enlevés par des dragues suceuses. Pour étudier l'évolution de la vase lâchée à partir des puits d'une drague, des mesures ont été effectuées au moyen de traceurs radioactifs injectés dans les puits d'une drague.

La campagne de mesure a montré, que la plus grande partie des sédiments, déposés par la drague, est mis en suspension et se déplace avec le courant et que leur décantation ne peut avoir lieu qu'au cours des étales.

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

c	- concentration	
c _a	- concentration au niveau z = - a	
$\bar{c}$	- concentration moyenne	
D	- diamètre du grain	L
d	- profondeur	L
g	- accélération de la pesanteur	LT ⁻²
i	- pente de la ligne de charge	
K _x	- coefficient de diffusion turbulente, longitudinale	L ² T ⁻¹
K _y	- coefficient de diffusion turbulente, transversale	L ² T ⁻¹
L	- dimension longitudinale du nuage radioactif	L
l	- dimension transversale du nuage radioactif	L
t	- temps après l'immersion	T
u _*	- vitesse de cisaillement	LT ⁻¹
V	- vitesse moyenne du courant	LT ⁻¹
W	- vitesse de chute des grains dans l'eau calme	LT ⁻¹
x	- axe horizontal	L
y	- axe transversal	L
Y = cd		L
z	- axe vertical	L
ε	- Énergie dissipée par unité de masse	L ² T ⁻³
κ	- constante de Karman	
ν	- viscosité cinématique	L ² T ⁻¹
ρ	- masse spécifique de l'eau	ML ⁻³
ρ _s	- masse spécifique de sédiment	ML ⁻³
$\rho' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$		
σ	- variance	

R E F E R E N C E S

- (1) PETERSEN (B.R) : Some Radioactive Surface Labelling Methods, INGENIQREN, Vol. 4, n°3, page 99, Septembre 1960.
- (2) ROSE (H) : Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Turbulence. Transactions, ASCE, Vol. 102, page 463 (1937).
- (3) PERNECKER (L) and VOLLMERS (H.J.) : Neuere Betrachtungsmöglichkeiten des Feststofftransportes in offenen Gerinnen. Wasserwirtschaft Jahrg 55, Heft 12, page 386, Dez. 1965.