

J.-M. MARTIN *

LES JAUGES RADIOACTIVES DE TURBIDIMÉTRIE

Introduction

La connaissance de la turbidité (c'est-à-dire de la masse de matière en suspension dans l'eau par unité de volume), joue un rôle déterminant dans l'étude des mécanismes de l'envasement de nombreux barrages et de la plupart des ports situés dans les zones estuariennes.

Ces accumulations de vase peuvent réduire la capacité des barrages et accroître le risque de débordement en cas de crue exceptionnelle et entraver la navigation dans les estuaires. Elles doivent donc être éliminées par des dragages coûteux; c'est pourquoi il est nécessaire de mieux connaître leur mode de formation.

La méthode la plus utilisée pour la mesure de la turbidité demeure la prise systématique d'échantillons dont la phase solide est séparée et dosée. En plus d'une maintenance considérable, cette méthode ne permet d'effectuer que des mesures discontinues; de plus l'appareil de prélèvement peut apporter une perturbation importante de l'écoulement.

Pour mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent la répartition de la matière en suspension, il est préférable d'utiliser des appareils permettant une *mesure continue et in situ de la turbidité*. Ces techniques de mesure doivent être conçues en fonction de l'échelle du phénomène et de la gamme de turbidité que l'on se propose d'étudier.

Dans les régions tempérées, les fleuves ont, en général, une turbidité inférieure à 1 g/l (moyenne mondiale de 330 mg/l pour la charge en suspension, et de l'ordre de 100 mg/l pour les éléments dissous [1, 2]. Pour les fleuves de l'Amérique du Nord il y a en moyenne 600 mg/l en suspension et 214 mg/l en solution [3]. Un fleuve comme

l'Amazone ne transporte en suspension que 100 mg/l et 36 mg/l en solution [4].

Toutefois, dans certaines conditions particulières: estuaire, retenues de barrage, la turbidité peut atteindre plusieurs dizaines de grammes par litre. Il en va de même pour les cours d'eau à régimes torrentiels, particulièrement lorsque le couvert végétal est peu développé.

On distinguera des méthodes *ponctuelles* et *continues* et des *méthodes d'intégration*.

Méthodes ponctuelles

Avant de décrire les jauges nucléaires nous dirons quelques mots des turbidimètres optiques dont le principe repose sur la mesure soit de l'absorption d'un rayon lumineux, soit de la dispersion de la lumière (effets Rayleigh et Tyndall). La sensibilité de la cellule photo-électrique semble permettre une bonne précision, toutefois les études de Richardson [5] ont montré que la diminution du flux lumineux serait proportionnelle à Σnd^2 (où n est la concentration en nombre de particules et d le diamètre de ces particules) au-dessus de 10μ et à Σnd en dessous sans que l'on sache d'ailleurs très bien où se situe la limite d'application des deux lois. Or les particules en suspension dans les cours d'eau ont précisément des dimensions voisines de 10μ .

Un certain nombre d'autres facteurs interviennent également, en particulier la forme, la couleur et la nature minéralogique des particules, enfin la longueur d'onde du rayonnement optique le rend facilement absorbable par la matière en suspension. Compte tenu de ces limites, il est donc difficile de s'attendre à de bons résultats sauf dans le cas d'une concentration faible de grains ayant sensiblement le même diamètre (sédiment monodispersé). Cette

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

méthode nous semble donc plus applicable en laboratoire sur un matériel homogène que sur le terrain.

Nous citerons parmi les divers appareils existant actuellement celui réalisé par la British Transport Dock Board [6] qui a donné satisfaction jusqu'à 3 g/l dans l'estuaire de la Gironde. L'impossibilité d'appliquer cette méthode pour des concentrations plus élevées est à la base du développement des jauges radioactives de turbidimétrie.

Les jauges radioactives de turbidimétrie.

Ces appareils sont constitués d'un ou plusieurs détecteurs qui permettent de mesurer la diffusion ou l'absorption par le milieu turbide d'un rayonnement X ou γ émis par une source radioactive. Le type de l'appareil est caractérisé par la géométrie de détection et la nature de la source.

LES JAUGES A TRANSMISSION.

Ces méthodes s'apparentent aux méthodes optiques en ce sens que l'on mesure l'absorption d'un rayonnement électromagnétique émis par une source radioactive. Une différence importante réside dans le fait que l'on mesure ici la densité globale, contrairement aux méthodes optiques qui permettent la détermination directe de la densité des suspensions.

Théorie de ces jauges [7] [8].

Dans ce type de sonde, on mesure l'intensité I d'un rayonnement nucléaire monoénergétique, d'intensité initiale I₀ après passage à travers une épaisseur x d'un corps de masse volumique ρ dont le coefficient d'absorption massique est μ . ($\mu = \mu'/\rho$ ou μ' est le coefficient d'absorption linéaire).

On a :
$$I = I_0 \exp(-\mu \rho x) \quad (1)$$

Dans le cas de l'eau pure, considéré comme milieu de référence :

$$I_e = I_0 \exp(-\mu_e \rho_e x) \quad (2)$$

Si nous considérons le cas particulier d'un solide (s) en suspension dans l'eau, l'absorption est équivalente à celle créée par une épaisseur x_s de sédiment et x - x_s d'eau :

$$I_{s,e} = I_0 \exp[-\mu_e \rho_e (x - x_s) - \mu_s \rho_s x_s] \quad (3)$$

soit en divisant (3) par (2) :

$$I_{s,e}/I_e = \exp[-x_s (\mu_s \rho_s - \mu_e \rho_e)] \quad (4)$$

Si l'on pose :

$$T = \frac{x_s \rho_s}{(x - x_s) \rho_e} \quad (5)$$

(4) devient :

$$I_{s,e}/I_e = \exp[-T \rho_e x (\mu_s \rho_s - \mu_e \rho_e) / (\rho_s + T \rho_e)] \quad (6)$$

Pour T petit :

$$\rho_s \gg T \rho_e$$

$$\rho_s + T \rho_e \approx \rho_s$$

d'où :

$$I_{s,e}/I_e = \exp[-T \rho_e x (\mu_s \rho_s - \mu_e \rho_e) / \rho_s] \quad (7)$$

en posant :

$$A = \rho_e (\rho_s \mu_s - \rho_e \mu_e) / \rho_s \quad (8)$$

On obtient finalement :

$$I_{s,e}/I_e = \exp(-AxT) \quad (9)$$

en développant en série :

$$I_{s,e}/I_e = 1 - AxT + (AxT)^2/2 - \dots \quad (10)$$

pour T petit :

$$I_{s,e}/I_e = 1 - AxT \quad (11)$$

soit :

$$(I_{s,e} - I_e)/I_e = -AxT$$

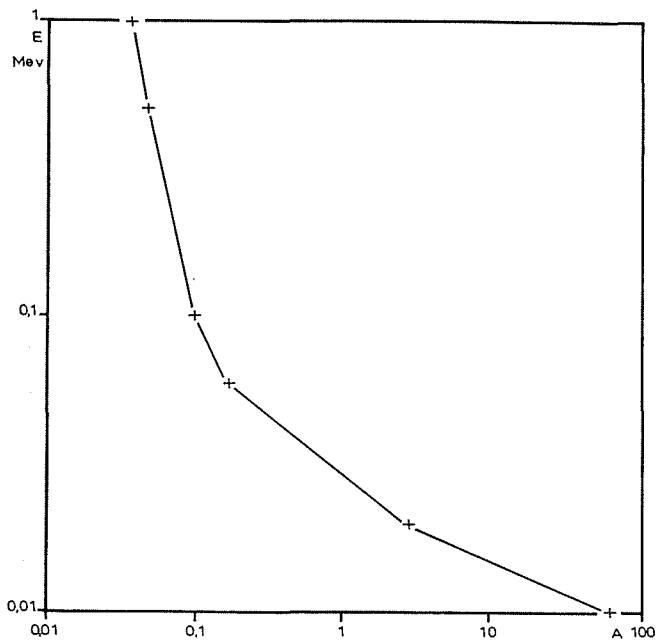
$(I_{s,e} - I_e)/I_e = f(T)$ est une fonction linéaire dont la pente $S = Ax$ définira la sensibilité de la mesure. On a donc théoriquement intérêt à augmenter Ax au maximum, soit en augmentant A par un choix judicieux de l'énergie du rayonnement, dont dépendent les coefficients μ_s et μ_e , soit en augmentant x.

Choix de l'émetteur utilisé.

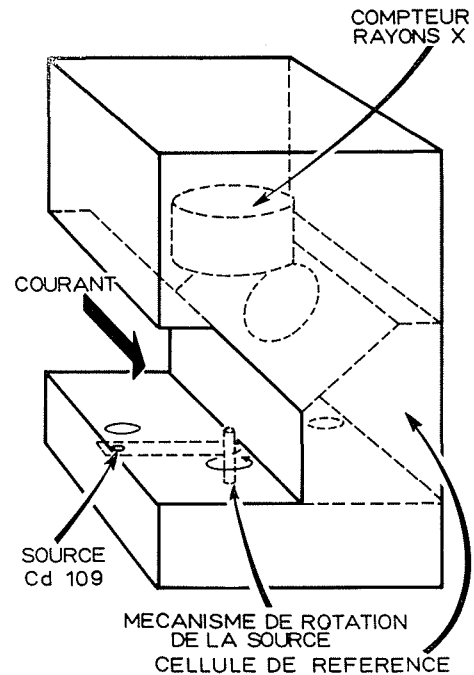
Le choix de l'énergie du rayonnement utilisé revêt une grande importance; elle doit, en effet être suffisante pour que le coefficient d'absorption soit peu sensible à d'éventuelles variations de la masse atomique des constituants de la matière en suspension, mais pas trop élevée pour conserver à la méthode une bonne sensibilité en présence d'une quantité aussi faible que possible de matière absorbante.

Nous donnons (tableau I) les coefficients d'absorption à

Tableau I				
<i>Coefficients d'absorption de l'eau, des principaux minéraux constitutifs des suspensions et de quelques autres corps [9, 10, 11]</i>				
CORPS	COMPOSITION CHIMIQUE	MASSE VOLUMIQUE (g/cm ³)	COEFFICIENT D'ABSORPTION MASSIQUE (cm ² .g ⁻¹)	
			22 KeV	60 KeV
Eau	H ₂ O	1	0,60	0,19
Quartz . . .	SiO ₂	2,65	1,84	0,24
Feldspath . .	KAlSi ₃ O ₈	2,54 à	2,71	0,28
	NaAlSi ₃ O ₈	2,76	2,76	0,29
Kaolinite . .	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2,60 à 2,63	1,62	0,23
Muscovite . .	KAl ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2,76 à 3,00	2,37	0,26
Calcite . . .	CaCO ₃	2,71	3,94	0,35
Chlorure de sodium . .	NaCl	2,2	5,40	0,31
Sulfate de sodium . .	Na ₂ SO ₄	2,7	2,09	0,24
Chlorure de calcium .	CaCl ₂	2,5	7,47	0,52
Aluminium .	Al	2,7	2,70	0,268
Fer	Fe	7,8	20,0	1,18
Plomb	Pb	11,4	61	3,55
Magnésium .	Mg	1,74	2,2	0,25
Calcium . . .	Ca	1,55	10	0,65
Sodium . . .	Na	0,97	13,7	0,22



1/ Variation du facteur A en fonction de l'énergie du rayonnement utilisé.



2/ Sonde « Panametrics » : représentation schématique de la tête de mesure.

22 et 60 KeV, pour différents minéraux et un certain nombre d'autres corps [9, 10, 11]. (Ces énergies correspondent respectivement aux rayonnements X et γ émis par le ^{109}Cd et ^{241}Am qui sont deux des radionuclides le plus souvent utilisés dans la réalisation des jauges radioactives de turbidité).

On remarque sur ce tableau que les variations du coefficient d'absorption avec la nature minéralogique de l'absorbant sont importantes à 22 KeV, elles deviennent faibles à 60 KeV, sauf pour la calcite. A partir de 100 KeV elles deviennent négligeables mais la sensibilité qui, comme nous l'avons vue, dépend directement de $\rho_s \mu_s - \rho_e \mu_e$ diminue de façon notable puisque les coefficients d'absorption de l'eau et du sédiment tendent l'un vers l'autre (fig. 1).

Choix de la distance source détecteur.

Comme nous l'avons signalé précédemment on a intérêt à augmenter la distance source détecteur; toutefois à partir d'une certaine distance l'absorption entraîne une diminution du taux de comptage telle que la précision statistique devient insuffisante. De plus l'augmentation de la distance accroît la proportion de rayonnement diffusé d'une énergie plus faible, dont le coefficient d'absorption varie avec la composition chimique. On déterminera donc la distance optimale de façon expérimentale.

Historique.

En 1952, Morgan et ses collaborateurs [12] proposent de déterminer la densité des vases de réservoir par la mesure de l'absorption d'un rayonnement de freinage (Bremsstrahlung d'une source $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ sur le plomb). Par la suite plusieurs appareils ont été mis au point notamment par des chercheurs soviétiques [13, 14], par J.-F. Cameron et T. Florkowski [9], C.-A. Ziegler et al. [15, 16], par J.-R. MacHenry et son équipe [17], J.-M. Martin et R. Cheslet [18]; enfin dernièrement T. Florkowski à l'A.I.E.A.,

G. Magloire au C.E.A., ont entrepris la réalisation de nouvelles jauges.

Nous examinerons brièvement les jauges permettant d'obtenir la meilleure sensibilité.

1° Jauge de C.-A. Ziegler (fig. 2) [15, 16].

Réalisée par la Société Panametrics Inc. Waltham, Massachusetts, son principe consiste à comparer l'absorption du rayonnement X de 22 KeV émis par du ^{109}Cd ($T = 470$ jours) ayant traversé une cellule d'eau distillée d'une part, d'eau ambiante d'autre part : le rapport des intensités des deux rayonnements est fonction du rapport des densités des deux liquides, donc en l'absence de quantité appréciable de sels dissous, fonction de la concentration en sédiment de l'eau ambiante.

Cette méthode comparative élimine les erreurs qu'entraîneraient la décroissance radioactive de la source, la dérive de la réponse du détecteur et de l'électronique associée, les variations de densité du liquide ambiant imputables à des variations de température. Cette jauge est utilisable de 1 à 50 g/l avec une précision d'environ 20 %.

2° Jauges de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique [9].

J.-F. Cameron et T. Florkowski ont réalisé deux jauges à radio-éléments utilisant, l'une 2 mCi de ^{109}Cd , l'autre 100 mCi de ^{241}Am ; pour des performances voisines notamment pour la jauge en ^{109}Cd elles sont plus simples et aisément portatives. Les auteurs donnent une précision de $\pm 0,3$ g à une concentration de 10 g/l, pour un temps de comptage de 3 mn, ce qui nous semble assez optimiste compte tenu de l'absence de cellule de référence.

3° Jauge de l'U.S. Department of Agriculture [17].

Après avoir procédé à des essais pour comparer les sondes de l'A.I.E.A., et celle de la « Panametrics »,

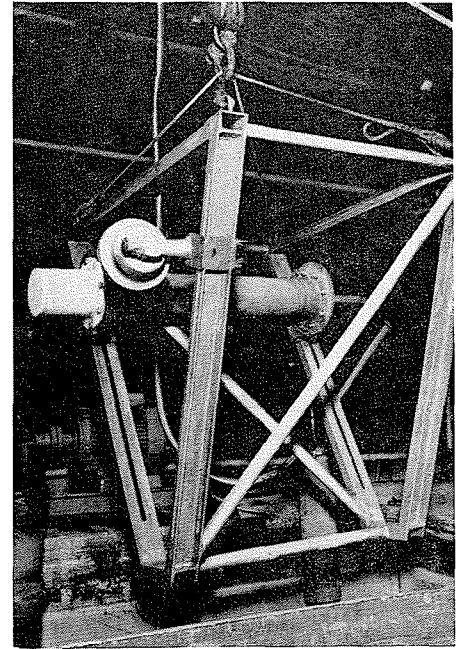
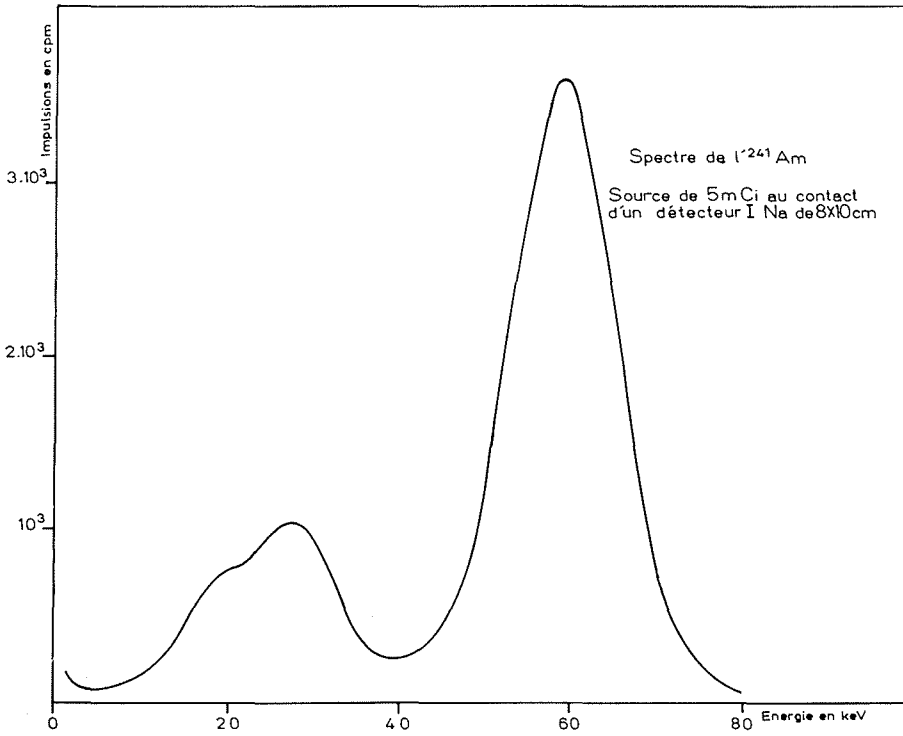


photo 1 / Sonde S.A.X.

3/ Spectre de l'Americium 241.

J.-R. MacHenry et ses collaborateurs ont présenté une nouvelle sonde au ^{109}Cd (M.S.G.II) d'une sensibilité supérieure aux précédentes.

Réalisation d'une nouvelle sonde à l'Americium 241 : S.A.X. [9].

A ce jour, seule la jauge de C.-A. Ziegler a été commercialisée (Panametrics Inc. Waltham, Massachusetts). D'un prix élevé elle présente également l'inconvénient d'une faible distance source-détecteur (8 cm) qui semblait susceptible de provoquer un effet de conduite dans un écoulement de vitesse élevée. De fait, les essais en canal effectués par le Laboratoire national d'Hydraulique de Chatou nous ont rassurés à cet égard, les lignes de courant n'étant pratiquement pas modifiées dans le champ de mesure.

De plus, bien que permettant d'obtenir une sensibilité meilleure, le rayonnement X de 22 KeV, voit, comme nous l'avons déjà signalé, son absorption varier dans des proportions importantes avec la composition chimique de la suspension. Enfin, la complexité mécanique du système de rotation de la source rend cette sonde fragile pour un emploi en nature.

Ces diverses considérations nous ont amené à réaliser une nouvelle jauge; son principe repose sur la mesure de l'absorption du rayonnement γ de 60 KeV émis par ^{241}Am (fig. 3).

a) Description de la sonde (cf. photo 1).

Elle est constituée d'un bâti prismatique à base rectangulaire en acier inoxydable. Les dimensions du bâti sont : $h = 85$ cm, base = 70×80 cm.

La source est un dépôt de 100 mCi de ^{241}Am , porté à sec dans une coupelle d'acier scellée dans une enveloppe plastique. Elle est fixée sur un chariot en acier inoxydable et lucoflex.

La partie détectrice comprend un cristal « Quartz et Silice » (NaI, Tl) de 4×5 cm, un photomultiplicateur

(Radiotechnique 53 AVP) et un préamplificateur à transistors. L'ensemble est placé dans un corps de sonde en acier inoxydable et lucoflex. La source et le détecteur peuvent être déplacés l'un par rapport à l'autre et séparés par une distance qui est déterminée en fonction de la turbidité ambiante. La distance optimale se situe à 32 cm pour des turbidités inférieures à 30 g/l.

Le bâti peut être orienté grâce à un plomb poisson muni d'une dérive, qui place l'axe du rayonnement émis perpendiculaire au sens du courant. La sonde est reliée par un câble multiconducteur étanche à un ensemble de comptage avec impression automatique réalisé à partir de tiroirs du standard Rénatran fabriqué sous licence C.E.A.

La structure du bâti de cette sonde permet de minimiser les perturbations engendrées par la présence de l'appareil dans le flux de particules drainées par le courant. De plus, cette sonde permet, par un simple réglage de l'électronique, d'effectuer le dosage de la turbidité par la mesure de l'activité γ totale.

b) Performances de cette jauge.

— Essai au laboratoire.

Les mesures d'étalonnage ont été effectuées dans une cuve parallélépipédique de 2 m^3 dans laquelle le sédiment était mis en suspension à l'aide d'une pompe à circulation d'un débit de $70 \text{ m}^3/\text{h}$. Les fortes turbidités ($> 10 \text{ g/l}$) ont été obtenues dans une cuve plus petite où l'on simulait la géométrie de détection. Les prélèvements de contrôle se faisaient à la pipette, la quantité de matière en suspension était pesée après filtration sur filtre Milipore $0,45 \mu$ et séchage à 60°C . Les courbes d'étalonnage sont données figure 4.

$I_{s,e}/I_e$ représente le rapport entre le taux de comptage dans le milieu turbide et celui mesuré dans l'eau distillée.

Les comptages ont été effectués avec un seuil de discrimination de 10 KeV.

Nous avons également reporté sur cette figure les droites d'étalonnage obtenues pour la sonde Panametrics mise à notre disposition par G. Courtois de la S.A.R. Saclay.

Pour la sonde S.A.X. avec de la vase de Gironde et une distance source-détecteur de 30 cm on obtient :

$$I_{s,c}/I_e = -0,065 T + 1$$

T = concentration en sédiment en %, avec du chlorure de sodium.

$$I_{s,c}/I_e = -0,087 S + 1$$

S = concentration en NaCl en %.

L'influence de la salinité est donc légèrement supérieure à celle de la turbidité.

Les mesures comparatives effectuées avec la sonde Panametrics donnent :

Pour la vase Gironde :

$$I_{s,c}/I_e = -0,139 T + 1$$

pour $0 < T \% < 1$;

$$= -0,120 T + 1$$

pour $1 < T \% < 2$;

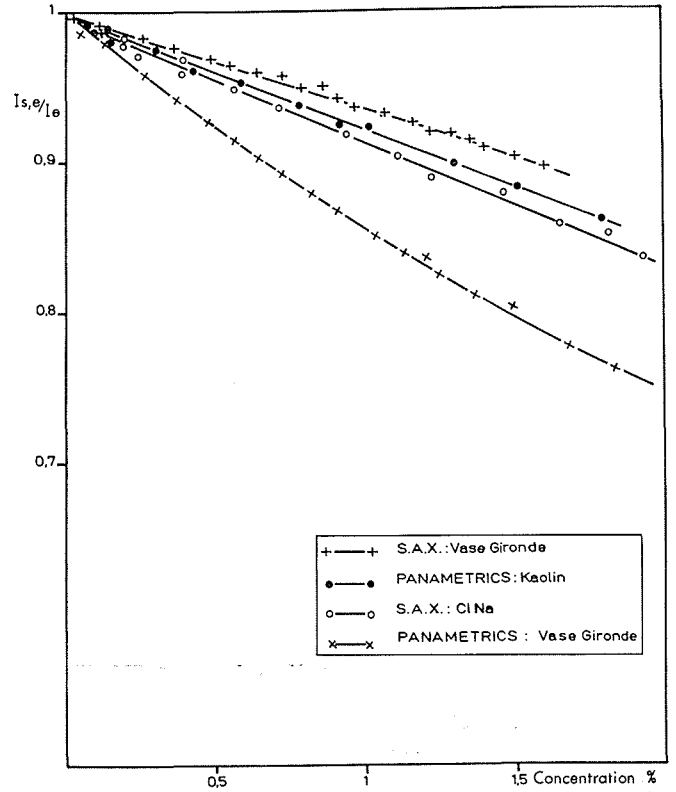
pour le kaolin :

$$I_{s,c}/I_e = -0,078 T + 1$$

On remarque que la sonde possède une meilleure réponse pour la vase Gironde que pour le kaolin, ceci peut être attribué à la présence de métaux (fer, notamment) dans la vase naturelle, qui augmente son coefficient d'absorption.

L'ensemble des essais réalisés en cuve nous a permis de situer à 1,2 g/l le seuil de détection de cette jauge, avec une erreur relative de 30 %, la précision augmente ensuite rapidement avec la concentration.

Avec le seuil de détection utilisé les fluctuations du taux de comptage sont demeurées, à température constante de 20 °C inférieures à 1 σ (fig. 5).



4/ Courbes d'étalonnage des sondes S.A.X. et Panametrics.

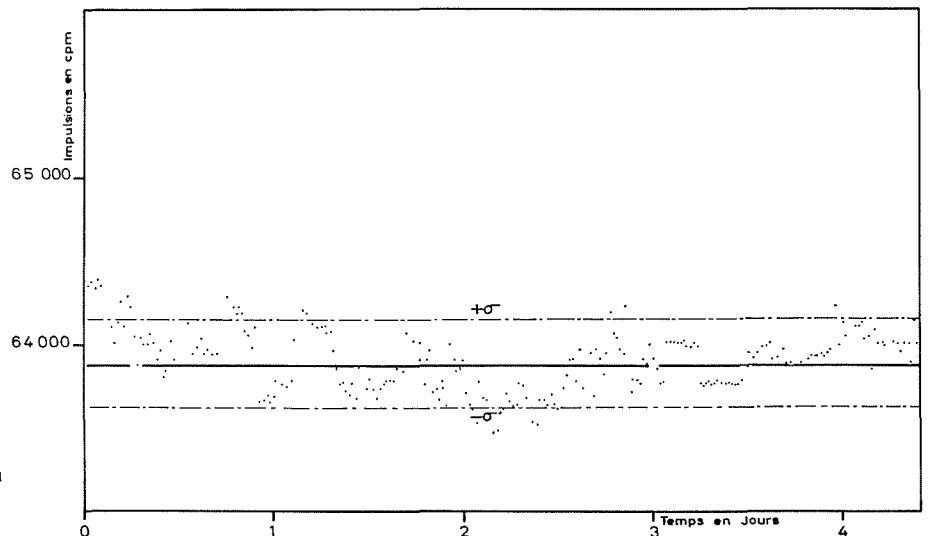
— Emploi in situ.

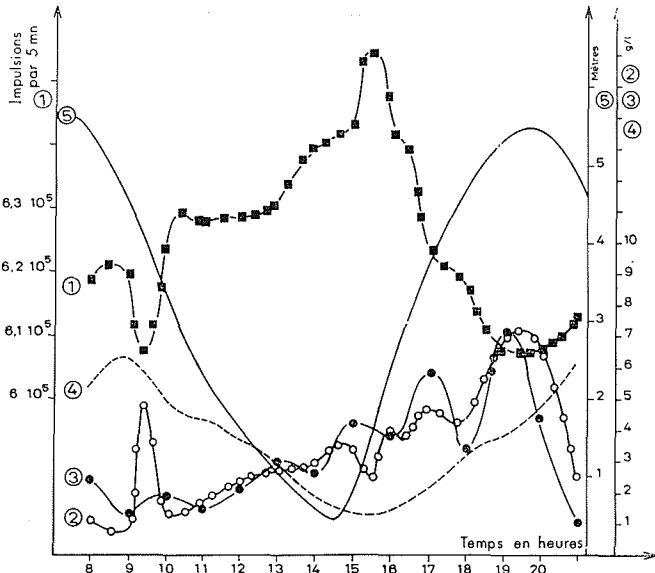
Une première campagne de mesure a été effectuée en Gironde du 12 au 30 novembre 1968, avec le concours du Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou et du Port Autonome de Bordeaux.

La sonde était installée à Pauillac à 50 m environ de la berge et à 50 cm au-dessus du fond. Un comptage a été enregistré toutes les 5 mn pendant les trois semaines de mesure (*).

(*) La T.H.T. et le seuil ont été stabilisés pendant toute la durée des essais.

5/ Variation du taux de comptage en fonction du temps (sonde S.A.X.).





6/

6/ Comparaison des mesures de turbidité à 50 cm du fond effectuées par la jauge de turbidité S.A.X. (courbe 2) et par prélèvements (courbe 3). Les courbes 1, 4 et 5 représentent respectivement le nombre d'impulsions enregistrées par unité de temps, la salinité observée et la hauteur d'eau variable avec la marée. Pauillac (Gironde), 22-11-1968; coefficient de marée = 98/95.

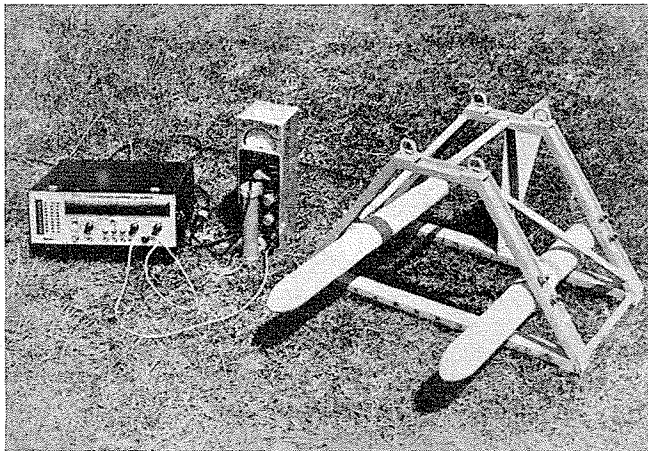
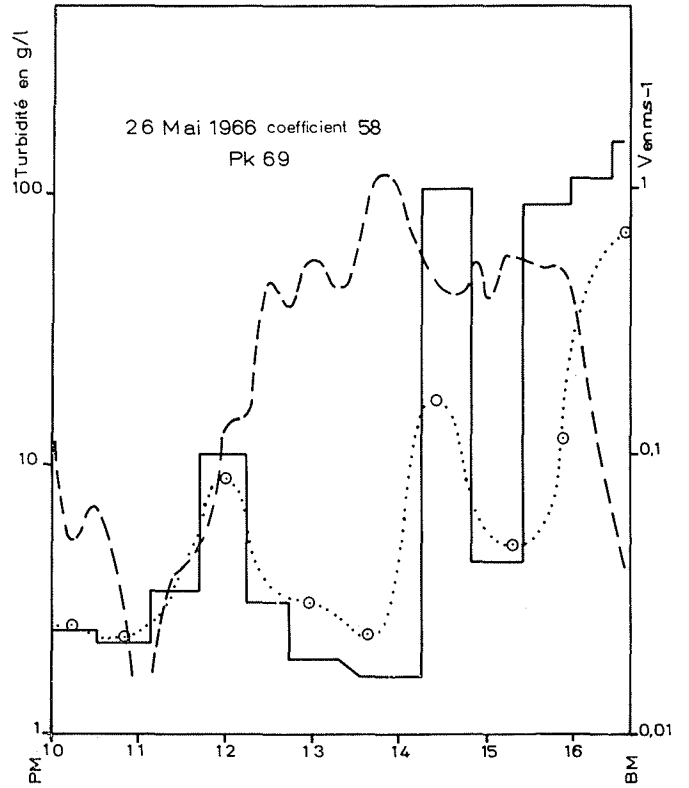
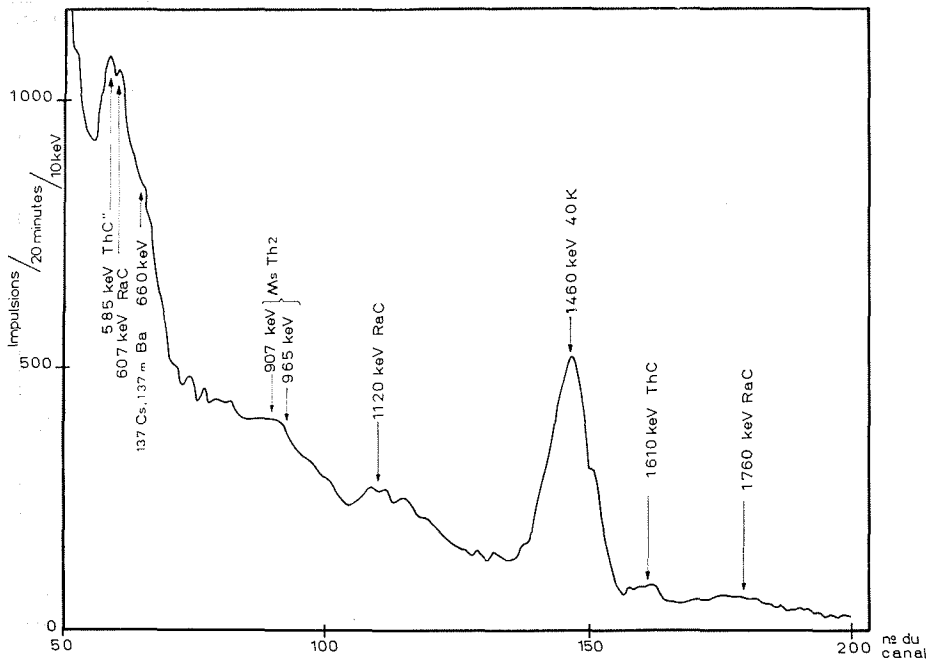


photo 2/ Sonde réalisée par la société « Atome Industriel ».



8/ Comparaison des mesures de turbidité effectuées par spectrométrie gamma *in situ* (trait continu) et par prélèvements (pointillé) en fonction de la vitesse du courant (tireté); coefficient de marée de 58; pK 69 (distance à Bordeaux en kilomètres). En abscisse temps écoulé entre pleine mer (P.M.) et basse mer (B.M.).



7/ Spectre gamma *in situ*, bruit de fond non déduit, réalisé dans la Gironde. Saint-Christoly: profondeur 6m; 1966, cristal Na I, (TI) (10 x 8 cm).

Méthodes d'intégration Utilisation de la radioactivité naturelle des sédiments

L'utilisation de cette sonde dans un estuaire à marée où l'on assiste à des variations périodiques de la salinité a nécessité la détermination continue des concentrations en sels. En effet, les coefficients d'absorption, pour un rayonnement γ de 60 KeV, du chlorure de sodium et des sédiments habituellement trouvés en suspension sont, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, très voisins. Il était donc indispensable de connaître l'influence de la salinité sur les taux de comptage observés pour pouvoir effectuer les corrections nécessaires à la mesure de la turbidité. Nous avons procédé à cette mesure par la mise en service d'un salinomètre continu.

Résultats obtenus. En dépit de la complexité de la mesure liée à la variation de la salinité, les résultats obtenus sont très concluants. Ils recourent de façon satisfaisante les valeurs de la turbidité déterminées par prélèvement à la bouteille horizontale et par radioactivité γ naturelle.

La figure 6 donne la courbe moyenne de turbidité observée par la sonde S.A.X. comparée à celle obtenue par prélèvements. Le grand nombre de données recueillies augmente la précision statistique de la courbe de turbidité.

Par ailleurs, les courbes obtenues permettent de mettre en évidence les fluctuations à courte période (variations de 10 à 50 % du poids de matière en moins de 5 mn) qui sont difficilement détectables à l'aide de prélèvements. Ces fluctuations rapides, sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement sont très fréquentes à certaines périodes de la marée. Elles traduisent une instabilité de la suspension probablement liée à des phénomènes de floculation en présence d'eaux marines.

c) Autres réalisations.

La sonde S.A.X. que nous venons de décrire constitue un matériel lourd et assez peu maniable réalisé à partir d'une électronique de laboratoire, mise à notre disposition par le Service d'Electronique Physique du C.E.A.

Reprenant un bâti de forme à peu près semblable (photo 2) C. Magloire a, en collaboration avec la Société Atome Industriel, cherché à rendre ce type d'appareillage portatif et autonome.

Le détecteur est un scintillateur NaI de $3,8 \times 2,5$ cm associé à un intégrateur S.P.P. 3 et une échelle de comptage E.C.P. 2 fabriqués par la Société S.R.A.T. Les performances sont sensiblement équivalentes à celles de la sonde S.A.X.

Après une étude approfondie de la stabilité de l'appareillage (température T.H.T., système de mise en forme), C. Magloire corrige la dérive par l'emploi d'une petite source de référence et de haute énergie (^{137}Cs) qui est collée au cristal; une mesure de rayonnement émis par cette source seule (en relevant le seuil par exemple) permet de réétalonner l'appareil à tout instant.

Cette sonde est actuellement en service dans une retenue du Midi de la France.

LES JAUGES A DIFFUSION.

La source est séparée du détecteur par un blindage. Ce type de jauge, fréquemment utilisé pour la mesure des densités de sédiments en place, n'a guère été utilisé en turbidimétrie, en raison d'une sensibilité insuffisante aux faibles concentrations. Nous rappellerons les travaux d'Emelyanov qui a proposé la détermination des turbidités supérieures à 6 g/l par la mesure dans une géométrie de diffusion, du rayonnement émis par du ^{170}Tm [14, 18].

Notons enfin que T. Florkowski poursuit actuellement la mise au point d'une jauge à diffusion utilisant comme émetteur ^{241}Am .

Les études que nous avons effectuées [20, 2] sur la radioactivité naturelle des suspensions nous ont amené à concevoir une nouvelle méthode de mesure de turbidité, basée sur la détection du rayonnement γ émis par les radio-éléments naturels. L'analyse au laboratoire d'un grand nombre d'échantillons prélevés en amont de l'estuaire de la Gironde avait révélé qu'il arrivait chaque année dans ce dernier, environ 20 Ci de ^{238}U , ^{232}Th et de leurs descendants supposés à l'équilibre. De plus, ces analyses avaient montré que l'activité spécifique de la matière en suspension, c'est-à-dire l'activité par gramme d'échantillon était sensiblement constante et suffisante pour être détectée directement *in situ*. Nous avons alors pensé utiliser cette activité comme traceur naturel de la matière en suspension. Une première campagne de spectrométrie γ *in situ*, effectuée en mai 1966, dans l'estuaire de la Gironde, portait sur la détection du RaC (^{214}Bi) (fig. 7). Elle avait permis de vérifier que l'activité de ce radionuclide naturel était détectable *in situ* au moyen d'un ensemble de comptage à haute sensibilité, de montrer que la turbidité était mesurable par cette méthode (fig. 8) et de définir les performances que devrait posséder un appareil simplifié. Une deuxième campagne a été réalisée en novembre 1968 à l'aide de détecteurs portatifs de radioactivité γ globale semblables à ceux utilisés par G. Courtois pour mesurer la turbidité dans la Loire en 1967 [22, 33].

Les résultats obtenus par cette méthode ont été comparés avec les mesures effectuées simultanément par gravimétrie, néphélométrie et absorption de rayonnement γ , ils permettent d'avoir une meilleure connaissance de la dynamique des matières en suspension dans l'estuaire de la Gironde.

Processus expérimental.

APPAREILLAGE UTILISÉ.

La radioactivité naturelle globale a été mesurée avec une sonde S.P.P. 3 équipée d'un cristal d'iodure de sodium activé au thallium relié à une échelle de comptage E.C.P. 2 des établissements S.R.A.T., avec un seuil de discrimination à 50 KeV.

Au cours de la campagne, deux séries de mesures ont été réalisées :

1° Des mesures à la station de Pauillac, dans la partie médiane de l'estuaire, à 50 m environ de la berge : le cristal d'iodure de sodium utilisé, d'une dimension de $3,8 \times 2,5$ cm était placé à 1 m sous le zéro des cartes, à environ 0,6 m du fond. La teneur en suspension a été déterminée simultanément par gravimétrie, (prélèvements à la bouteille horizontale Mecabolier et filtration sur filtre Millipore de $0,45 \mu$) sur 150 échantillons, ainsi que par transmission γ (sonde S.A.X.) [18] et néphélométrie (turbidimètre optique B.T.D.B.) [6].

2° Des mesures le long de l'estuaire : ces expériences avaient pour but de déceler les zones à forte turbidité. Elles comprenaient :

a) Des mesures en station fixe aux pK * 10, 27,5 47 et 71,5; la sonde détectrice équipée d'un cristal $3,8 \times 2,5$ cm était placée à environ 0,8 m du fond sur un traîneau.

(*) pK : distance de Bordeaux en km.

En outre, une mesure a été effectuée à 3 m du fond avec une sonde équipée d'un cristal $4,4 \times 2,5$ cm possédant un meilleur rendement de détection : cette sonde était mariée à un filin d'acier lesté par un saumon.

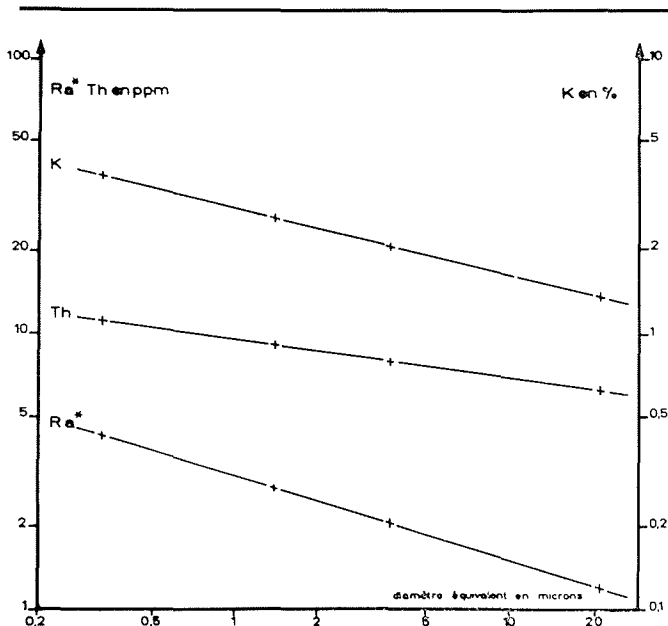
b) Des mesures en dynamique avec le même dispositif, le traîneau étant remorqué par l'embarcation.

Les temps de comptage nécessaires à l'obtention d'une précision statistique suffisante ont varié de 100 s à 1 000 s selon la turbidité.

MESURES D'ÉTALONNAGE.

Pour permettre la détermination de la turbidité, les taux de comptage bruts obtenus dans l'estuaire ont dû être corrigés d'un certain nombre de facteurs.

Le taux de comptage est en effet la résultante de plusieurs paramètres dont l'influence a été déterminée avec le plus grand soin.



9/ Variation des concentrations en potassium et radium en fonction de la taille des particules dans un échantillon de vase prélevé dans l'estuaire de la Gironde.

Influence de la teneur en potassium.

L'eau de l'estuaire est un mélange en proportion variable d'eau douce et d'eau de mer, celle-ci contient du potassium dont l'isotope de masse 40 est naturellement radioactif ($3,5 \gamma/s/g$ de K pur). Dans la méthode décrite ici on détecte les photons γ dont l'énergie est supérieure à 50 KeV. On va donc devoir soustraire du nombre de chocs mesurés, ceux dus au ^{40}K contenu dans l'eau de mer. Cette influence a été déterminée en cuve ($2 \times 3 \times 5$ m) au laboratoire dans de l'eau de ville enrichie en KCl. La réponse pour un cristal de $3,8 \times 2,5$ cm est de $1,9$ cps/g de K.

Influence de la hauteur d'eau au-dessus des sondes qui provoque un effet de blindage vis-à-vis du rayonnement cosmique.

Elle a été déterminée au laboratoire (cuve remplie d'eau de ville), en mer et dans le lac Léman. Cette influence, pour la sonde $3,8 \times 2,5$ cm utilisée à Pauillac, est égale à

$N = N_0 H^{-k}$ avec $k = 0,71$ et $N_0 = 0,60$ cps pour une hauteur H telle que $0,2 \text{ m} < H < 10 \text{ m}$.

Influence de la radioactivité du fond.

Celle-ci a été déterminée pour des fonds de natures variées tant sur le terrain qu'au laboratoire. Les courbes obtenues pour les différentes sondes sont de la forme :

$$N_d = N_0 e^{-\alpha d}$$

- d : distance au fond en mètre;
- N_0 : taux de comptage, cristal au contact du fond, en cps;
- N_d : taux de comptage à la distance d du fond en cps;
- α : coefficient déterminé expérimentalement égal à 5,7 pour la sonde $3,8 \times 2,5$ cm.

Influence du bruit de fond propre à l'appareillage.

En milieu infini et dans une eau ne contenant pas d'émetteur, il existe un bruit de fond propre à l'appareillage utilisé, dû principalement aux impuretés radioactives contenues dans le photomultiplicateur (40 K notamment) et au bruit électronique. Ce bruit de fond propre déterminé dans le lac Léman est de 0,5 cps pour la sonde $3,8 \times 2,5$ cm utilisée à Pauillac.

Autoabsorption du rayonnement.

Par suite des variations de densité du milieu dans lequel on opère, on doit tenir compte de l'autoabsorption du rayonnement par le sel d'une part, par la matière en suspension d'autre part. Ce facteur a été déterminé de façon expérimentale et un certain nombre de corrections ont été effectuées pour les turbidités supérieures à 10 g/l. Il n'a pas été tenu compte de l'autoabsorption par le sel, la salinité étant demeurée inférieure à 5‰ à Pauillac ou négligeable devant les très fortes turbidités (couche crème).

MESURE DE TURBIDITÉ.

Après avoir effectué les corrections précédentes, nous avons déterminé la réponse de la sonde $3,8 \times 2,5$ cm en fonction de la turbidité. Elle s'exprime ainsi :

$$N_T = aT^b$$

avec :

- N_T : taux de comptage redevable à la turbidité;
- T : turbidité en g/l;
- a et b coefficients : si $0 < T < 10$ g/l on aura $a = 0,18$ et $b = 0,8$.

On remarque que $b < 1$, c'est-à-dire que si la turbidité augmente l'accroissement du nombre de coups dN_T/dT diminue. Comme ce phénomène a été observé pour des turbidités assez faibles, inférieures à 10 g/l, on ne peut invoquer un phénomène d'autoabsorption du rayonnement. Ceci traduit plus vraisemblablement une propriété importante des particules élémentaires en suspension dont l'activité augmente avec la diminution du diamètre. Ceci semble bien confirmé par l'analyse en laboratoire par spectrométrie γ de différentes fractions granulométriques de vases défloculées de la Gironde (fig. 9), séparées par sédimentation dans de l'eau distillée. Malgré la présence d'ions flocculants dans l'eau de la Gironde, on peut penser qu'un certain nombre de particules péliques très fines restent bien individualisées surtout pour les faibles turbidités, où leur proportion est plus grande.

Résultats obtenus sur l'estuaire de la Gironde.

Les mesures basées sur la détection de radioactivité naturelle ont été corrigées par différents facteurs étudiés précédemment et sont exprimées directement en g/l de sédiment séché à 95 °C.

COMPARAISON DES MÉTHODES DE MESURE DE TURBIDITÉ.

Cette comparaison a été effectuée à la station fixe de Pauillac située à 50 m de la berge. Sur la figure 10, sont portées les valeurs des turbidités obtenues par les quatre méthodes suivantes : gravimétrie (« prélèvements »), radioactivité naturelle, scintillométrie (« radioactivité naturelle »), néphélométrie (« B.T.D.B. ») et absorptiométrie de rayonnement γ (« S.A.X. »).

On note dans l'ensemble une très bonne corrélation entre les différentes méthodes. Pour la méthode basée sur la radioactivité naturelle, le seuil de détection égal à 0,5 g/l s'est révélé bien adapté aux turbidités généralement observées en Gironde. Le temps de 1 000 s choisi pour obtenir une précision statistique suffisante sur le taux de comptage permet d'intégrer les fluctuations rapides de la concentration mises en évidence à l'aide de la sonde S.A.X. sans toutefois être trop long afin de pouvoir observer les variations secondaires de la turbidité difficilement décelables par des prélèvements ponctuels.

Après cette comparaison, nous avons pu employer cette méthode pour étudier la turbidité de l'estuaire de la Gironde.

MESURES DANS L'ESTUAIRE.

Mesures à la station de Pauillac (fig. 11 et 12).

Dans le cas particulier de cette station la turbidité se caractérise par un important maximum situé à mi-flot lors du maximum de courant, on note également une légère augmentation en fin de jusant.

Mesures à point fixe dans le chenal de navigation.

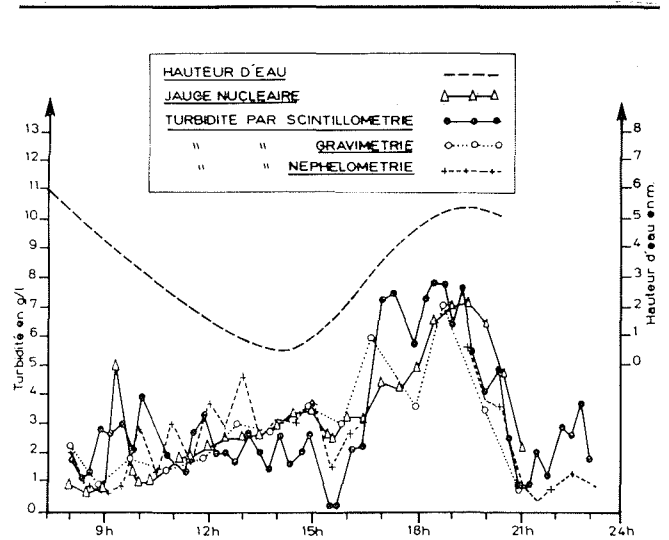
Ces détections aux PK 10, 27,5 et 47 ont mis en évidence deux pics de turbidités. L'un en flot et l'autre en jusant. Les concentrations les plus fortes s'observent quand la variation de vitesse est la plus grande. Au PK 71, il ne subsiste qu'un seul maximum de turbidité.

Les comparaisons entre les diverses stations sont délicates en raison des différents coefficients de marée pendant les mesures. On remarque cependant une turbidité plus forte dans la partie médiane de l'estuaire: cette accumulation correspond au « bouchon vaseux » décrit par L. Glan-geaud [24].

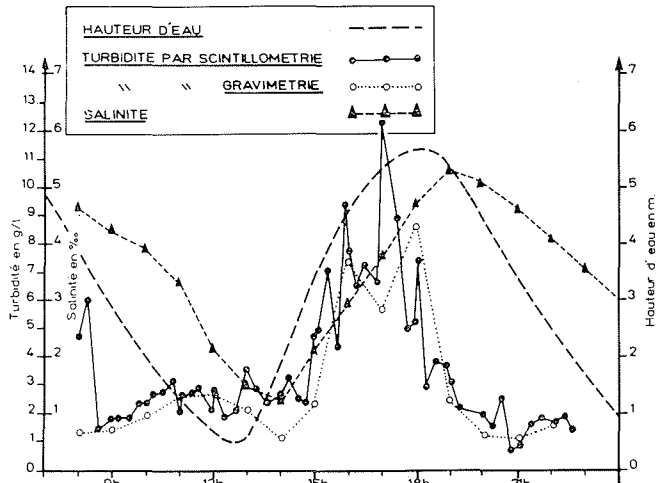
Les figures 13 et 14 se rapportent aux PK 27,5 et 71: seule est figurée la turbidité à 3 m du fond, car les résultats de la sonde placée à 0,80 du fond ont été faussés par un enfouissement progressif du traineau au cours de la mesure.

Détection dynamique (fig. 15).

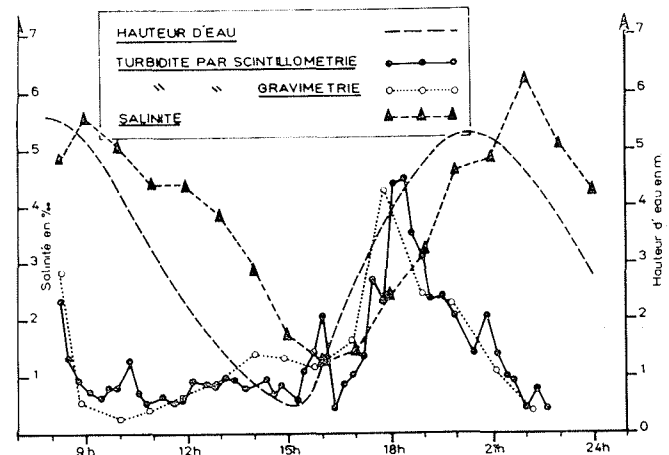
Nous avons effectué ces mesures dans le chenal de navigation avec des coefficients et des périodes de marées différents, ce qui rend leur comparaison difficile. Nous pouvons cependant mettre en évidence, de façon certaine, une couche à forte densité (turbidité de 100 g/l) atteignant 2 m d'épaisseur dans le fond des chenaux. Cette couche, généralement appelée « couche crème » [8] est particulièrement développée entre les PK 50 et 60. Des observations précédentes [5] jointes à celles effectuées lors de cette campagne, montrent que cette couche peut rester



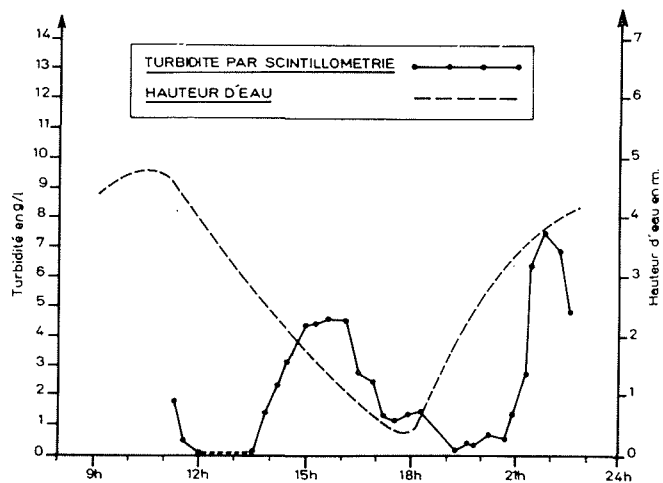
10/ Comparaison des méthodes de mesure de la turbidité. Pauillac (Gironde), 22 novembre 1968; coefficient de marée 98/95, sondes placées à 0,6 m du fond.



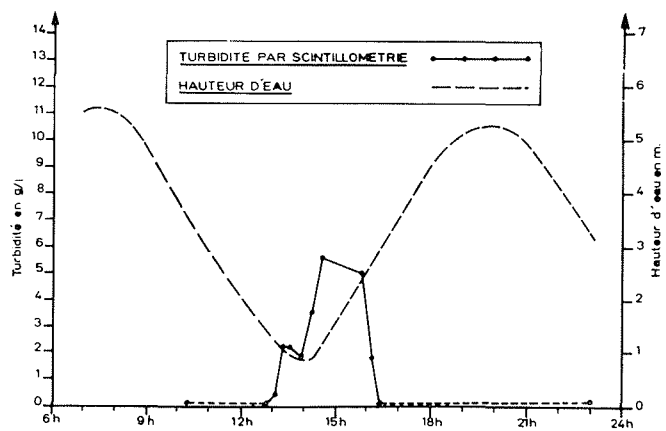
11/ Turbidité dans l'estuaire de la Gironde. Pauillac (pK 17), 20 novembre 1968; coefficient de marée 100/101, sonde à 0,6 m du fond.



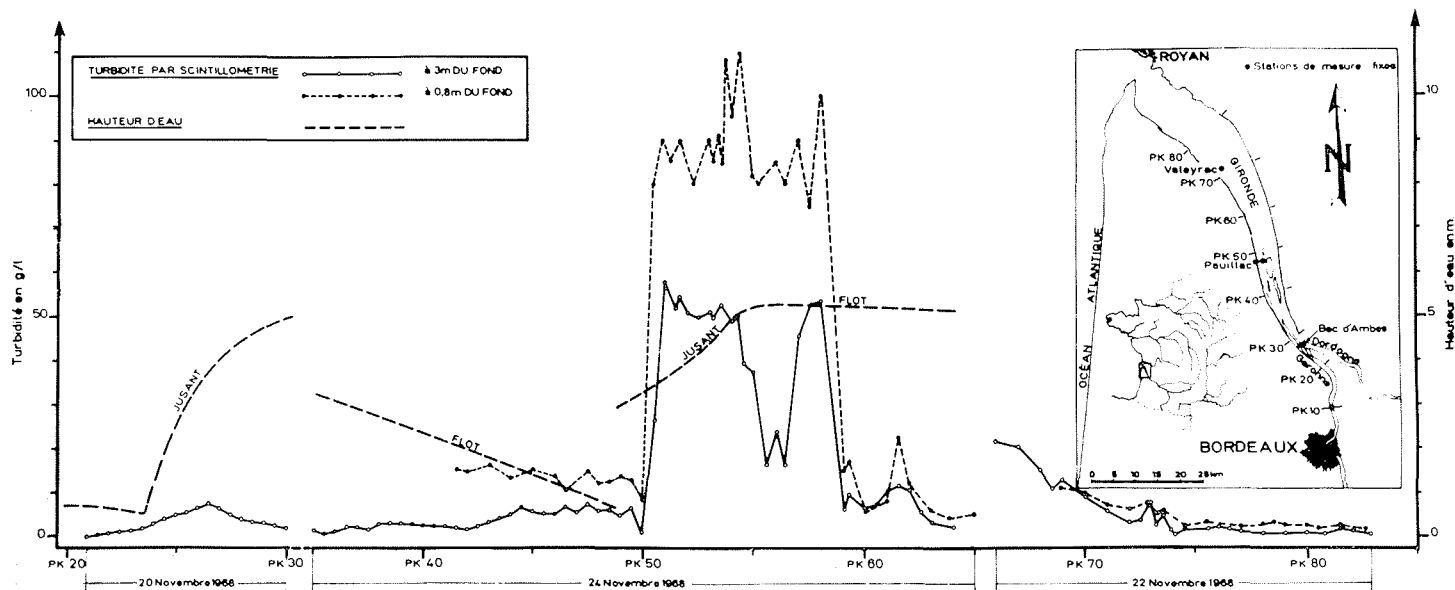
12/ Turbidité dans l'estuaire de la Gironde. Pauillac (pK 47), 23 novembre 1968; coefficient de marée 90/84, sonde à 0,6 m du fond.



13/ Turbidité dans l'estuaire de la Gironde. Bec d'Ambès (pK 27,5), 25 novembre 1968; coefficient de marée 65/60, sonde à 3 m du fond.



14/ Turbidité dans l'estuaire de la Gironde. Valeyrac (pK 71,5), 23 novembre 1968; coefficient de marée 90/84, sonde à 3 m du fond.



15/ Répartition longitudinale de la turbidité dans l'estuaire de la Gironde et localisation des stations de mesure.

bien individualisée pendant plusieurs jours, indépendamment du sens et de la vitesse des courants de surface. Dans cet estuaire, la répartition verticale des vitesses sur la tranche d'eau n'obéit donc pas aux lois classiques de l'écoulement, l'échange de matières en suspension s'établit difficilement entre le fond et la surface, même pour des courants de surface de plusieurs m/s. Cette couche, dont l'évolution est très lente, peut quelquefois disparaître brusquement dans des conditions qui restent à préciser sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement.

Le 24 novembre, pour un coefficient de marée de 78-71, nous avons localisé la couche crème entre les PK 50 et 60. Le 28 novembre, le coefficient de marée ayant diminué jusqu'à 51, elle s'est déplacée ou réformée vers le PK 65.

Les résultats des mesures effectuées à 3 m du fond et destinées à mettre en évidence le « bouchon vaseux », sont sans doute trop élevés car le détecteur intègre le rayonnement émis dans une sphère d'environ 2 m de diamètre pour les hautes énergies : la corrélation qui semble apparaître entre la couche crème, détectée par la sonde à 0,8 m, et

le bouchon vaseux, peut donc s'expliquer en partie par l'influence du rayonnement émis par la couche crème sur la sonde supérieure.

Conclusion.

Cette expérience avait pour but principal de définir les possibilités d'application des mesures de radioactivité naturelle à la détermination *in situ* de la turbidité. Les résultats montrent une très bonne concordance avec ceux obtenus par les techniques classiques (gravimétrie et néphélométrie) ou nouvelle (sonde S.A.X.). Les résultats ont valeur d'intégrale pendant un temps de comptage préalablement choisis, ce qui élimine les erreurs commises lors de prélèvements ponctuels.

De plus, l'activité des vases de la Gironde est suffisante pour pouvoir mesurer des turbidités de 1 g/l jusqu'à plusieurs centaines de g/l. Cette gamme située vers les très fortes turbidités nous paraît particulièrement bien convenir aux problèmes des estuaires.

Pour augmenter la précision de la mesure, il serait souhaitable de déduire la radioactivité des sels dissous (ions uranyles notamment) qui n'excèdent cependant pas, d'après nos mesures 5 à 10 % de l'activité totale. Une étude systématique de l'activité des particules en fonction de l'époque de l'année reste à faire.

Néanmoins, les variations saisonnières probables de l'activité des particules apportées par la Garonne doivent être amorties dans l'estuaire en raison de la faible quantité de ces apports au regard de la masse totale de matières en suspension dans celui-ci.

Les premiers résultats sur l'estuaire de la Gironde par cette nouvelle méthode nous conduisent à penser que l'étude de la formation de la « couche crème » et du « bouchon vaseux » pourra être réalisée facilement par cette méthode pour autant que l'on dispose de mesures prolongées pendant plusieurs mois en quelques points de l'estuaire et couplées avec des mesures des propriétés physicochimiques de l'eau et des sédiments.

Conclusion générale

L'envasement des grands ports situés dans les zones fluviomarines et de nombreux barrages pose un problème d'une importance économique considérable. Sa résolution demande une connaissance approfondie de l'évolution de la turbidité dans le temps et dans l'espace, connaissance qui ne peut être obtenue que par la mise en œuvre de méthodes de mesures *en continu* et *in situ*. C'est dans ce sens qu'un certain nombre de travaux ont été entrepris afin de développer une jauge radioactive de turbidimétrie. Les recherches ont été orientées dans deux voies, l'une utilisant une source de radioactivité artificielle, dont le rayonnement est mesuré dans une géométrie de transmission, et plus rarement de diffusion, l'autre fondée sur la détection du rayonnement γ émis naturellement par la matière en suspension. C'est cette dernière méthode qui donne les résultats les plus encourageants, tout au moins en ce qui concerne les turbidités supérieures à 1 g/l, ceci semble suffisant pour étudier la plupart des problèmes d'envasement, notamment en milieu estuaire.

Toutefois les appareils mis au point n'ont pas encore dépassé le stade expérimental. A cela plusieurs raisons : il s'agit d'abord de méthodes relativement nouvelles et le prix de revient de ces appareils est encore élevé, ce qui fait que beaucoup d'utilisateurs restent attachés aux moyens conventionnels. Enfin une meilleure coopération entre ces derniers, qui se trouvent malheureusement dans l'obligation d'obtenir des résultats à court terme et les laboratoires de recherche fondamentale serait souhaitable.

Il nous reste donc à espérer que cette réunion favorise de tels contacts et à remercier l'A.T.E.N. d'en avoir pris l'initiative.

Bibliographie

- [1] LIVINGSTONE (D.). — Chemical composition of rivers and lakes. (1963). *Geol. Survey Prof. Paper.* 440, G. (1964).
- [2] ALEKIN (D.A.) and BRAZHNIKOVA. — The discharge of soluble matter from dry land of the Earth. *Gidrokhim. Materialy*, vol. 32, p. 12-24, (Translated into English by M. Fleischer, U.S.G.S.) (1961).
- [3] JUDSON (S.) and RITTER (D.F.). — Rates of regional denudation in the United States. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 64, p. 3395-3401 (1964).
- [4] GIBBS (R.J.). — The geochemistry of the Amazon River system : Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geo. Soc. Am. Bull.*, vol. 78, p. 1203-1232 (1967).
- [5] RICHARDSON (E.G.). — The suspension of solids in a turbulent stream. *Roy. Soc. London*, ser. A, vol. 162 (1937).
- [6] *British Transport Dock Board.* — Hayes Road, Southall, Middlesex, Grande-Bretagne.
- [7] MARTIN (J.M.). — Rapport préliminaire concernant l'élaboration d'une nouvelle jauge radioactive de turbidimétrie. *Rapport interne D.R.M.E.* (novembre 1968).
- [8] MAGLOIRE (C.). — Rapport d'activité sur une sonde à absorption gamma de la raie 60 KeV de l'Am241. *Rapport interne C.E.A. Saclay*, D.R./S.A.R.S./89-14. C.M./J.J. (1969).
- [9] CLARK (G.L.). — Encyclopedia of X-Rays and gamma-Rays. *Reinhold Publishing Corporation*, New York (1963).
- [10] SEIGBAHN. — Beta and gamma ray spectroscopy. *North Holland Publishing Company*, Amsterdam (1955).
- [11] MORGAN (G.W.), BIZELL (O.M.), MANOV (G.G.), MITCH (J.W.). — Radiation analysis. *U.S. Patent* 2, 722, 609 (novembre 1955).
- [12] ARKHANGELSKI (M.M.). — Application of radioactive isotopes for investigation of suspended sediment in rivers. *Heat Engineering and Hydrodynamics*, vol. IV, 82-88. A.E.C. Tr 4206 (1957).
- [13] BELIKOV (M.P.), EMELYANOV (Y.A.) and NESTEROV (V.B.). — Use of radioactive isotope in Hydro-Engineering. *Israel Program For Scientific Translation*. Jerusalem (1964). (Transl. from Russian.)
- [14] PAPADOULOS (J.) and ZIEGLER (C.A.). — Radioisotopes technique for monitoring sediment concentration in rivers and streams. « Radioisotopes instruments in industry and Geophysics ». *Symposium A.I.E.A.*, Warsaw, SM 68/26, (octobre 1965).
- [15] SELLERS (B.), PAPADOULOS (J.) and ZIEGLER (C.A.). — Radioisotopes gauge for monitoring suspended sediment concentration in rivers and streams. *Nyo-2983-J*, Tid 4500 (1966).
- [16] Mac HENRY (J.R.) et al. — Performance of nuclear sediment concentration gauges in the use of isotopes in hydrology. *Symp. A.I.E.A.*, Vienne, SM 83/17 (novembre 1966).
- [17] EMELYANOV (V.A.), NESTEROV (V.E.) and SHUMAKOV (B.B.). — The problem of measuring water turbidity and the attenuation of a beam of γ -rays. *Sbornik trudov Yuzh NIIGi M*, N° VI, Novochoerkassk, (1959).
- [18] MARTIN (J.M.) et CHESSELET (R.). — Présentation d'une nouvelle jauge nucléaire de turbidimétrie. *C.R. Somm. Soc. Géol. France*, p. 42-43 (3 février 1969).
- [19] MARTIN (J.M.). — Utilisation des radioéléments naturels comme traceurs dans l'étude de quelques problèmes de sédimentologie dynamique. *Thèse géologie marine*, Paris (février 1966).
- [20] CHESSELET (R.) et MARTIN (J.M.). — Note sur l'application de la spectrométrie gamma *in situ* à l'étude du débit solide dans l'estuaire de la Gironde. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* 2° série, fasc. 1, p. 123-126 (1969).
- [21] COURTOIS (G.). — Expériences de radioactivité naturelle et artificielle en Loire-Maritime. *Rapport interne C.E.A. Saclay*, DR/AR.S. 68-3/GC/J.J. (Janvier 1968).
- [22] ANGUENOT (F.) et COURTOIS (G.). — Etude de la radioactivité naturelle des sédiments de la Loire Atlantique. I. Mesure de turbidité par radioactivité naturelle. II. Etude des sédiments déposés. *Rapport Interne C.E.A. Saclay*, DR/AR.S/69-16/F.A./G.C./J.J. (1969).
- [23] GLANGEAUD (L.). — Le mouvement des sédiments et la formation des bancs, seuils et mouilles dans la Garonne et l'estuaire de la Gironde. *Congr. Union géod. et Géoph. Int.*, Washington 1939. Comm. de Potamologie, quest. 3, rapport 6. 14 p, (1939).

