LES APPLICATIONS DES RADIOÉLÉMENTS AUX LABORATOIRES DE SÉDIMENTOLOGIE

PAR C. MIGNIOT *

Avant-propos

Comme en nature, les radio-éléments apportent de nombreux avantages pour étudier certains problèmes délicats que l'on est amené à résoudre dans un laboratoire de sédimentologie.

A l'état de traceurs, les particules étant marquées, soit dans la masse par incorporation d'un isotope radio-actif à la masse d'un support équivalent, soit en surface, en fixant une certaine activité de traceur à la surface des particules, les radio-éléments permettent de suivre avec une grande précision le déplacement de différents types de sédiments sous des actions hydrodynamiques souvent complexes. Les radio-éléments ont l'avantage sur d'autres types de traceurs, tels que les fluorescents et luminescents, ou plus simplement les particules colorées, de pouvoir être repérés en continu dans le temps et dans l'espace (en surface et en profondeur) même si le milieu transporteur a une opacité importante, ce qui est le cas dans des eaux chargées de vase par exemple. Les lois sur les mouvements sédimentaires peuvent ainsi être précisées, en particulier lorsqu'il s'agit d'un transport d'un mélange de sédiments pélitiques (vase) et de sédiments grossiers (sable).

Les traceurs radio-actifs peuvent également être d'un grand intérêt pour contrôler la fidélité d'un modèle; ils apportent des éléments supplémentaires au tarage sédimentologique en permettant de mesurer la direction et l'importance d'un mouvement sédimentaire sous une action hydraulique précise et de courte durée, phénomène qui échappe souvent aux investigations globales que l'on est obligé de faire. La comparaison entre les mesures faites en nature par traceur et reproduite sur le modèle apporte

un élément supplémentaire de vérification de la bonne reproduction des phénomènes sédimentologiques.

A l'état de source ponctuelle, les radio-éléments permettent de réaliser des jauges simples susceptibles de mesurer, par absorption de rayons gamma, la variation de densité d'une vase en cours de tassement ou, d'une manière plus générale, la densité d'un sol contenu dans un réceptacle de forme géométrique connue. La mesure directe de densité de sol dans les carottes provenant de forages est un exemple d'application de cette méthode. Dans un autre domaine, il est possible de mesurer, sur un modèle réduit, la masse de vase déposée par unité de surface, au cours du temps et d'en déduire ainsi les risques de sédimentation et leur rythme.

L'utilisation des radio-éléments en laboratoire de sédimentologie ne se limite pas à ces deux cas particuliers mais, comme en nature, la mesure de la radio-activité naturelle sur des échantillons prélevés *in situ* fournit un élément supplémentaire d'information qui, au même titre que les études chimiques, minéralogiques ou granulométriques, permettent d'établir des présomptions sur l'origine et le mode de cheminement des sédiments. De même, à partir de la mesure directe du rayonnement naturel émis par les sédiments fins, il est possible en nature comme sur un modèle réduit de vase, de mesurer les variations de la turbidité des eaux et de contrôler ainsi les débits solides en suspension introduits ou soustraits aux limites d'un modèle; ce procédé est particulièrement intéressant lorsque l'on doit mesurer de fortes turbidités, dont l'analyse en continu échappait aux détections par les procédés optiques.

Il faut également citer l'application des radio-éléments en laboratoire de sédimentologie pour l'autoradiographie, dans l'étude de l'altération des roches dont les procédés ont été mis au point et appliqués à l'Institut de géologie du bassin d'Aquitaine.

On peut dire que ce qui est valable pour les sédiments

* Ingénieur en chef du Service de Sédimentologie du Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

reste vrai pour le milieu aqueux, et qu'il est possible de suivre à l'aide de traceurs radio-actifs les conditions de transferts des eaux, soit dans un autre milieu aqueux, soit au sein même du fluide. Il serait ainsi possible d'apporter des précisions dans certains phénomènes de percolation, sous l'action de la houle, de l'eau dans des plages sableuses, et de mieux suivre certains phénomènes de diffusion rencontrés dans les rejets d'eaux chaudes ou d'eaux polluées en rivière ou en mer.

Afin de concrétiser ces différents domaines d'utilisation des radio-éléments et de montrer qu'avec un matériel relativement simple, et pour un prix de revient admissible, il est possible d'utiliser les méthodes, mises au point par le département des Radio-éléments du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay (S.A.R. Saclay), dans un laboratoire de sédimentologie ou d'hydraulique, des exemples sont donnés à partir des résultats obtenus par différents laboratoires et en particulier par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.).

Ces exemples portent sur les points suivants :

— Etude en canal du débit solide par charriage à l'aide de traceurs radio-actifs. Ces mesures faites au Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.) en 1964 ont montré les conditions de transport des sables et prouvé que le débit solide calculé par la méthode du centre de gravité est très proche du débit solide réel.

— Etalonnage du modèle réduit du Niger. Cet étalonnage a été réalisé au L.N.H. en reproduisant sur modèle réduit, et sous les mêmes actions hydrauliques — réalisées aux échelles de similitude du modèle — les mêmes mouvements du matériau artificiel marqué que ceux relevés en nature à l'aide de verre broyé au ^{182}Ta .

— Etude en canal du déplacement de vase fluide sous l'action d'un courant uniforme. Ces recherches faites au L.C.H.F. en collaboration avec le C.E.A. ont apporté certains éléments sur le déplacement de la crème de vase dans différents cas particuliers.

— Etude en canal du transport et du triage des sables par des courants de turbidité de vase. Ces études récentes, faites au L.C.H.F., ont permis d'examiner les possibilités de transport de différentes catégories de sable par des courants de densité ayant des turbidités comprises entre 25 et 200 g/l. Les résultats obtenus illustrent tout particulièrement les avantages que l'on peut obtenir dans des recherches à deux ou plusieurs phases granulométriques par l'utilisation de radio-éléments.

— Mesure de la sédimentation dans le chenal navigable du modèle du Mahury. Cette étude a été faite dans un des modèles du L.C.H.F. en recherchant, à l'aide d'une jauge radio-active ponctuelle, le rythme et l'importance de la sédimentation pour différentes actions hydrodynamiques.

— Etude de la variation de la concentration dans un dépôt sédimentaire de vase en cours de tassement. Les études effectuées au L.C.H.F. sur plusieurs types de vases fluviaux et marines ainsi que sur des limons montrent qu'il est possible de définir les concentrations aux différentes profondeurs du dépôt et aux différents stades de consolidation. Parallèlement des mesures sont faites au laboratoire de Géologie marine de Nantes pour savoir si ce procédé est applicable aux mesures de densité *in situ* dans des carottes sédimentaires.

Mettant à la disposition des laboratoires de nouvelles méthodes de recherches et de mesures, les radio-éléments permettent d'aborder l'étude d'un certain nombre de problèmes sédimentologiques en échappant à des mesures fastidieuses et en apportant des réponses quantitatives dans des domaines encore peu exploités.

Etude en canal des débits solides par charriage à l'aide de traceurs radio-actifs

Généralités.

Dans le cadre de l'étude générale consacrée à la mesure du débit solide des cours d'eau par charriage, le Laboratoire National d'Hydraulique a réalisé en 1964 différents essais en canal, à l'aide de traceurs luminescents et radio-actifs.

Ces études faites en collaboration avec la Section d'Application des Radio-éléments du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay constituaient, à notre connaissance, les premières applications quantitatives des techniques nucléaires à des essais en canal. Elles ont permis de mettre au point toute une technologie de marquage des sables, ou de matériaux artificiels devant les schématiser sur les modèles, ainsi que les dispositifs pratiques d'injection et de détection *in situ* d'un traceur dans une masse sédimentaire.

Sur le plan sédimentologique les essais ont apporté des précisions sur le mode de charriage des sables avec dunes et sans saltation.

Conditions expérimentales.

LES INSTALLATIONS D'ESSAIS.

Les essais ont été effectués dans un canal fixe vitré de 0,25 m de largeur et 43 m de longueur (fig. 1). L'alimentation en eau était assurée par un groupe moto-pompe muni d'un by-pass pour les fonctionnements à faible débit. Un déversoir triangulaire étalonné permettait de mesurer le débit à l'amont et d'en déduire la vitesse moyenne d'écoulement, connaissant la hauteur de l'eau. La pente de la ligne d'eau était relevée à l'aide de pointes limnimétriques réparties sur toute la longueur du canal.

Un chariot automoteur, se déplaçant à vitesse constante, supportait les appareils de détection.

LE MATÉRIAU UTILISÉ.

Les essais ont été réalisés en utilisant pour schématiser les sables un polystyrène transparent et granulé de densité 1,055 dont le pouvoir absorbant des rayonnements gamma était sensiblement le même que celui de l'eau. La granulométrie des particules était comprise entre 3 et 3,5 mm, elle était pratiquement uniforme. Afin d'éviter des phénomènes de tension superficielle entre grains mouillés, ce matériau était préalablement dépoli par voie mécanique.

LE TRACEUR RADIO-ACTIF.

Les particules de polystyrène ont été marquées superficiellement en utilisant l'or 198 comme élément radio-actif. Les différentes phases de marquage par ce procédé comportaient :

- traitement préalable par une solution de potasse à 10 % pendant 20 mn pour nettoyer les grains;
- décantation et lavage des grains;
- traitement par solution de chlorure d'étain;
- traitement par solution de chlorure d'or radio-actif;
- lavage.

Le rendement de fixation par ce procédé était en moyenne de 45 % et l'on a vérifié que les propriétés physiques des grains, en particulier leurs vitesses de chute n'étaient pas affectées par le marquage.

Au total 6 000 à 10 000 grains ont été utilisés pour chaque essai représentant une activité globale variant de 5 m.Ci à 15 m.Ci.

ÉTUDE EN CANAL DES DÉBITS SOLIDES PAR CHARRIAGE A L'AIDE DE TRACEURS RADIOACTIFS

(Expériences LNH)

1/ SCHÉMA DE L'INSTALLATION

2/ RÉPARTITION DES ACTIVITÉS DANS LE CANAL APRÈS 1H20 ET 7H40

3/ PROGRESSION DU CENTRE DE GRAVITÉ ET DU POINT MAXIMUM D'ACTIVITÉ

4/ DÉCROISSANCE DU TAUX DE COMPTAGE MAXIMUM (N_{max})

LES APPAREILS D'IMMERSION ET DE DÉTECTION.

Le dispositif d'injection consistait en une sorte de tiroir fermé contenant le lot marqué dont les faces supérieure et inférieure seules pouvaient glisser entre des supports fixes. Descendu au voisinage du fond, ce dispositif permet de répandre une couche d'épaisseur uniforme (1 cm) sur une longueur maximale de 20 cm et une largeur de 22 cm (plus faible que la largeur du canal de 25 cm afin d'éviter les effets de parois).

L'appareillage de détection monté sur le chariot comprenait :

- une sonde à scintillation SRAT, collimatée et située à une distance de 27 cm du fond mobile;
- un intégrateur de même marque comportant douze seuils d'énergie (de 50 KeV à 2 MeV) et six gammes de sensibilité de taux de comptage étagés entre 0-50 chocs par seconde et 0-15 000 chocs par seconde;
- un intégrateur de puissance en parallèle avec le premier, car le signal de celui-ci était insuffisant pour attaquer directement l'enregistreur;
- un enregistreur (Cdc) du type galvanométrique, l'inscription se faisant sur papier métallisé.

Différents types de collimateur de la sonde à scintillation ont été essayés afin d'obtenir le rendement maximum de l'installation.

Résultats des essais.

Les essais ont été réalisés avec une hauteur d'eau moyenne au-dessus des fonds meubles de $h = 11$ cm et un débit liquide de $Q = 3,9$ l/s, la pente du fond et de la ligne d'eau $J = 0,25 \cdot 10^{-3}$. La rugosité globale de Strickler était de $k = 60$ et la rugosité de Strickler propre au fond de $k_f = 46,5$. Le nombre de Reynolds de l'écoulement $Re = 11\,600$.

La force tractrice sur le fond :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_H \cdot J = 2,13 \text{ dynes/cm}^2$$

et la vitesse de frottement :

$$U^* = (g \cdot R_H \cdot J)^{1/2} = 1,45 \text{ cm/s}$$

Dans ces conditions expérimentales, le débit solide mesuré en extrémité du canal correspondait en moyenne à 13,5 l/h et était voisin du débit solide alimenté. Les régimes d'écoulement et de charriage étaient donc uniformes et permanents.

Les détections des traceurs radio-actifs effectuées au cours des essais (18 détections par essais) ont permis de suivre la progression dans le canal des particules marquées.

D'une façon générale, si l'on n'a pas retrouvé exactement la même répartition d'activité au cours des deux essais successifs ayant les mêmes caractéristiques hydrauliques, les vitesses moyennes de déplacement du centre de gravité du lot de particules marquées restaient parfaitement comparables.

Après 1 h 20 mn d'essais, on observe (fig. 2) que le traceur s'est déplacé de 6 m vers l'aval, la répartition présentant un front très raide vers l'aval et relativement étalé vers l'amont; ce type de répartition correspond à un déplacement par dunes.

Après 7 h 40 mn, le front du traceur est situé à 25 m du point d'injection et il ne reste pratiquement plus d'activité entre l'origine et un point situé à 16 m.

Le L.N.H. a pu démontrer que la vitesse de déplace-

ment du centre de gravité du traceur correspondait à la vitesse moyenne des particules charriées.

En portant la progression du centre de gravité en fonction de la durée d'action du courant sur les fonds, on constate (fig. 3) que la progression du centre de gravité est régulière, bien que le charriage par dunes soit essentiellement discontinu. Différents essais effectués avec les mêmes conditions expérimentales aboutirent à la même conclusion.

En moyenne, le centre de gravité du lot de particules marquées s'est déplacé de 2,65 m/h. Cette valeur est légèrement plus faible que celle que l'on pourrait mesurer en suivant le taux de comptage maximum. Ce taux de comptage maximum décroît d'ailleurs en fonction de la durée des expériences, passant par exemple de 15 000 chocs/s à 4 000 chocs/s après 8 h d'essais. Cette décroissance illustre l'étalement du traceur au cours de son transport (fig. 4).

A partir de la vitesse moyenne de déplacement du traceur radio-actif, le L.N.H. a effectué un calcul de débit solide par la méthode dite du centre de gravité; la valeur trouvée par cette méthode atteint 13,25 l/h et peut être considérée comme identique à celle mesurée par empotement en extrémité du canal et qui était, rappelons-le, de 13,5 l/h. Cette méthode de calcul fait intervenir l'épaisseur moyenne de charriage et reste assez délicate à appliquer, la détermination de l'épaisseur de la couche uniforme équivalente de matériau charrié nécessitant un levé précis des fonds sur un long tronçon homogène.

On remarque également que le débit solide mesuré par empotement ou par la méthode de traceurs radio-actifs est peu différent de celui que l'on aurait pu obtenir à partir de la formule de charriage de Meyer-Peter généralisée :

$$g''s = (\tau - \tau_0)^{3/2} \frac{g^{1/2}}{K^{3/2} \omega^{1/2}}$$

avec :

- $g''s$: débit solide en poids sous l'eau de matériau charrié par unité de temps et unité de largeur du lit;
- τ : force tractrice sur le fond;
- τ_0 : force tractrice critique d'entraînement des matériaux;
- g : accélération de la pesanteur;
- ω : poids volumique sous l'eau des matériaux;
- K : coefficient sans dimension de Meyer-Peter = 0,25.

Avec cette formule établie cependant pour des écoulements pleinement turbulents et des granulométries éten-

5/ Photographie LNH : Aspects des fonds après 7 h 50.

dues de matériaux, on aurait trouvé un débit solide de 11,75 l/h (en admettant un indice des vides de 0,5) au lieu de 13,25 l/h donné par la méthode des traceurs et 13,5 l/h par mesure directe.

Précisons qu'au cours des essais, la distance moyenne entre dunes était de 1,25 m, leur amplitude maximale atteignait 4 cm et leur amplitude moyenne 2 cm (fig. 5). La vitesse de déplacement visuel de ces dunes était en moyenne de 3,7 m/h, c'est-à-dire plus rapide que celle déterminée à partir de la méthode du centre de gravité d'un lot de particules marquées.

Ces premières expériences faites sur l'utilisation de traceurs radio-actifs pour étudier le déplacement des matériaux artificiels schématisant les sables sur un modèle réduit apportaient la preuve de la validité de cette méthode et des possibilités qu'elle offrait pour suivre en continu, sans interruption des essais, la progression et l'estimation quantitative d'un phénomène sédimentaire.

Utilisation de traceurs radio-actifs pour l'étalonnage du modèle du Niger

Généralités.

Il s'agissait au cours des études faites par le L.N.H. sur le Niger d'examiner les conditions de navigabilité dans la partie supérieure du fleuve sur le tronçon Koulikori-Segou. Une campagne de mesures en nature, faite en 1958, à l'aide de traceurs radio-actifs (verre broyé au tantal 182 d'une période de 111 jours) et d'une sonde étanche couplée à un gammamètre, avait permis de déterminer le processus de transport des alluvions en différents points caractéristiques du lit et pour différents régimes du fleuve. On avait constaté en particulier qu'en étiage la vitesse moyenne d'avancement des grains était de 7 m par jour (écarts entre 2 et 18 m suivant le débit du fleuve) et que le déplacement s'effectuait avec peu de dispersion latérale; la largeur du front du traceur restant constante et de 3 m environ, les déplacements ont pu être suivis pendant 500 m environ (70 jours). En décrue, contrairement à ce que l'on pouvait penser, la vitesse moyenne de déplacement était plus faible qu'en étiage bien que le débit soit plus important; en moyenne, la vitesse de déplacement atteignait 2 à 4 m par jour, mais avec une dispersion latérale très grande qui se caractérise par un étalement de la tâche radio-active, alors qu'en étiage les trajectoires étaient filiformes.

Pour vérifier que le modèle réduit représentait bien fidèlement la nature, le L.N.H. a pensé appliquer les mêmes méthodes de traceurs radio-actifs sur le modèle et de contrôler que pour des mêmes actions hydrauliques, les déplacements s'effectuaient dans des conditions homologues à celles de la nature. Cette expérience était particulièrement intéressante puisqu'elle permettait de contrôler sur un phénomène de courte durée (70 jours en nature) que les caractéristiques du matériau artificiel destiné à représenter le sédiment naturel étaient bien adaptées aux échelles géométriques pour le modèle.

Conditions expérimentales.

LE MATÉRIAU UTILISÉ. LE TRACEUR.

En général le matériau artificiel schématisant sur un modèle réduit un sable est constitué par une matière ayant

une densité réduite par rapport à son homologue naturel. Les matières utilisées peuvent être très diverses, allant des matières plastiques — avec toute leur gamme de densité étagée entre 1,02 et 1,60 — aux granulés de charbon ou aux dérivés du bois. Sur le modèle du Niger, le L.N.H. avait utilisé un matériau de densité 1,23 constitué de noyaux d'abricots concassés à une granulométrie comprise entre 1,5 et 4 mm.

Ce matériau s'est avéré pouvoir être un traceur très acceptable après irradiation dans un des réacteurs de Saclay. Le noyau d'abricot contient, en effet, du manganèse 56 et du sodium 24, émetteurs gamma durs ayant une périodicité respective de 2,6 h et de 15 h. Il contient malheureusement aussi du zinc 65 dont la période de 245 jours est trop grande pour des essais représentatifs sur modèle réduit et entraîne à la longue la contamination du modèle.

Au total 1 200 grains représentant une activité totale de 20 m.Ci de ^{24}Na ont été injectés en différents points du modèle.

APPAREILLAGE DE MESURE.

Les mesures d'activité sur le modèle ont été faites à l'aide d'un scintillateur portatif monté dans un collimateur (fermeture de 4 cm) placé à 12 cm au-dessus du fond du lit. La détection était opérée point par point par quadrillage de 10×10 cm. Il s'agissait évidemment d'une méthode assez rudimentaire, mais qui avait le mérite d'être précurseur et de fournir malgré la simplicité de l'appareillage des résultats parfaitement valables.

LES CONDITIONS HYDRAULIQUES.

Les expériences sur le modèle ont été réalisées dans les mêmes conditions hydrauliques, aux échelles près, que celles relevées en Nature au moment de la détection des traceurs radio-actifs.

Résultats des essais.

En traçant les courbes d'isochocs relevées sur le modèle, il a été permis d'obtenir un schéma des mouvements du traceur radio-actif sur le modèle et d'en comparer les résultats avec les mesures faites en nature. On retrouve sur le modèle, après 72 mn d'action des courants, des déplacements de matériaux ayant de grandes analogies avec les observations qui avaient pu être effectuées en nature après 35 jours. Le résultat tendait à prouver, d'une part, la fidélité du modèle dans la représentation des mouvements sédimentaires, d'autre part, de fournir l'ordre de grandeur de l'échelle des temps sédimentologiques applicables à une action hydraulique précise.

Il a également été possible de poursuivre l'expérience pendant plus de 3 h, tout en obtenant une bonne détection des particules radio-actives entraînées par les courants sur une distance de 4 m environ. Une telle détection aurait été, sinon impossible, du moins très difficile, avec un traceur fluorescent ou un matériau coloré par suite de l'enfouissement des grains; dans le cas du Niger cette détection n'aurait pu se faire après un parcours des particules sur une distance de 1 m environ.

Cette première expérience de traceur radio-actif sur un modèle apportait la preuve qu'il était possible — sous réserve d'améliorer la qualité du traceur, en évitant en particulier de travailler avec des isotopes de longue période et de mettre au point une électronique de mesure plus précise — de vérifier l'étalonnage d'un modèle et d'en préciser son échelle des temps sédimentologiques.

6/ Vue du canal inclinable.

Etude en canal du déplacement de vase fluide sous l'action d'un courant uniforme

Généralités.

L'érosion des vases sous l'action d'un courant uniforme a fait l'objet de nombreuses recherches que le L.C.H.F. a déjà eu l'occasion de présenter, soit aux réunions de l'Association des Sédimentologues français, soit à celles de la Société Hydrotechnique de France.

On a montré (*La Houille Blanche*, n° 7/1968) que la variation de la vitesse critique d'érosion en fonction de la concentration d'une vase dépend essentiellement de la nature du sédiment et du milieu aqueux qui constituent le complexe sol-eau. Il existe donc une multitude de courbes donnant la vitesse critique d'érosion en fonction de la concentration. Par contre, si l'on étudie les conditions d'érosion en fonction de la rigidité initiale des dépôts, on peut, en première approximation, établir que quel que soit le type de complexe sol-eau, on a :

$$U_* \approx 0,50 \tau_y^{1/2}$$

si :

U_* : vitesse critique de frottement en cm/s;

τ_y : la rigidité initiale en dynes/cm².

Rappelons que l'érosion puis l'entraînement des vases par les courants s'effectuent différemment suivant l'état de tassement des dépôts. Pour des vases très consolidées, tassées depuis très longtemps, il faut atteindre des vitesses de plusieurs mètres par secondes pour arracher de véritables morceaux de vases qui sont entraînés en conservant leur individualité propre et forment, après un parcours plus ou moins long, les galets de vases que l'on rencontre en nature. Pour des vases plastiques, déposées depuis quelques semaines — ou au plus quelques mois — on constate l'apparition de plissements sur la surface des dépôts et des figures de déchirement; la vase peut être érodée du fond pour des vitesses inférieures à 1 m/s et se dilue dans l'eau. Pour les très faibles concentrations, ce qui peut correspondre aux vases fraîchement déposées ou « crème de vase », la suspension se comporte comme un véritable fluide visqueux avec apparition sous l'action de courants assez faibles d'ondes d'interface qui pourront se disloquer, entraînant un mélange de la vase fluide et de l'eau. Par

ailleurs, on observe visuellement dans un canal l'apparition d'une pente des fonds qui s'exhaussent en aval et s'abaissent à l'amont; cette pente est d'autant plus accusée que la vitesse des courants est plus élevée et peut entraîner un écoulement de la crème de vase vers l'aval.

Afin de mettre au point une méthode de mesure du déplacement de la crème de vase sur les fonds, le Laboratoire Central d'Hydraulique de France a étudié avec le département des Radio-éléments du C.E.A. (Saclay) les possibilités de marquer la vase fluide sur la hauteur du dépôt et de suivre ses déplacements sous l'action des courants. Le but de ces premières manipulations n'était pas de rechercher des lois de transport mais d'examiner la méthodologie à utiliser pour y parvenir; l'utilisation de colorants injectés dans la masse de la vase s'était avérée inefficace pour effectuer des mesures valables.

Conditions expérimentales.

LE CANAL ET LES CONDITIONS SÉDIMENTOLOGIQUES.

Les essais ont été réalisés dans un canal vitré inclinable de 12 m de longueur et 0,40 m de largeur, alimenté en eau à sa partie amont par un dispositif répartiteur assurant un écoulement aussi régulier que possible (fig. 6). En aval, une vanne déversoir permettait de régler la cote de l'eau. Les vitesses étaient mesurées sur toute la hauteur au-dessus des fonds à l'aide de micromoulinets et le débit évalué par un déversoir étalonné.

La vase était introduite au centre du canal dans un réceptacle aménagé sur le fond. Ce réceptacle avait 12 cm de profondeur et 3 m de longueur et contenait par conséquent 215 dm³ de mixture (fig. 7). Une fois rempli, le fond du canal présentait une continuité parfaite sur toute son étendue.

Le sédiment utilisé pour ces expériences était du kaolin industriel, la concentration de la mixture étant de 100 g/l et correspondant à une rigidité très faible de 2 dynes par cm² environ.

Afin de faciliter les conditions de détection, la hauteur d'eau dans le canal a été réglée à 12,5 cm au-dessus des fonds.

LE RADIO-ÉLÉMENT.

Le traceur radio-actif utilisé était constitué par une suspension de kaolin marquée à l'or 198 conformément aux procédés mis au point par le département d'application des Radio-éléments de Saclay. Au total 150 cc de kaolin d'une concentration de 100 g/l ont été marqués avec une activité globale de 6,6 m.Ci, c'est-à-dire avec une activité extrêmement faible limitant au strict minimum la contamination du canal.

IMMERSION DU RADIO-ÉLÉMENT.

La mixture de vase, contenue dans le réceptacle du canal vitré, a été marquée sur toute sa hauteur en substituant 150 cc de mixture inactive par 150 cc de kaolin marqué à l'or colloïdal et ayant la même concentration (fig. 8). De cette façon, on ne risquait pas de voir le traceur s'étaler sur le fond du canal par suite d'une différence de densité entre les deux milieux.

La mise en place du traceur a été faite en descendant dans la mixture de vase, un cylindre ouvert à ses deux extrémités et reposant au fond du canal sur une feuille de caoutchouc assurant l'étanchéité. La mixture inactive a été pompée à l'intérieur du cylindre et remplacée par le traceur radio-actif qui était centré dans l'axe longitudinal du canal. Après substitution, le cylindre a été relevé très

ÉTUDE EN CANAL DU DÉPLACEMENT DE VASE FLUIDE SOUS L'ACTION D'UN COURANT UNIFORME

(Expériences LCHF)

7/ SCHEMA DE L'INSTALLATION ET DE L'APPAREILLAGE

8/ SCHEMA DE MISE EN PLACE DE LA VASE MARQUEE

9/ REPARTITION DE L'ACTIVITE APRES DIFFERENTS TEMPS

10/ DEPLACEMENT DE L'ACTIVITE MAXIMALE AUX COURS DES ESSAIS

11/ DECROISSANCE DE L'ACTIVITE AU COURS DES ESSAIS

lentement à l'aide d'un dispositif mécanique et l'on a pu contrôler que la surface du lit n'avait subi aucune perturbation appréciable.

APPAREILLAGE DE MESURE.

L'appareillage électronique utilisé était le même que celui employé pour les autres mesures radio-actives en laboratoire ou en nature; ils comportent :

- une sonde SRAT fortement collimatée pour observer des coupes perpendiculaires au sens du déplacement. Cette sonde était placée sur un chariot pouvant se déplacer sur la totalité du canal avec une vitesse réglable (dans le cas des expériences 1 cm/s);
- une source de tension autonome alimentant la sonde;
- une échelle de comptage à trois voies, couplée à une imprimante à impression rapide. Cette échelle permet de travailler avec des seuils de discrimination sélectionnés après étalonnage de l'ensemble. Dans le cas présent, les comptages ont eu lieu sur deux seuils de 50 et 250 KeV.

Les temps de comptage étaient de 3 s, séparés par des temps d'arrêt de 0,2 s, réservés à l'impression et à la remise à zéro.

Parallèlement et simultanément l'évolution de l'expérience était visualisée par enregistrement graphique sur ETP 3 (enregistreur transistorisé portatif SRAT).

MESURES EFFECTUÉES ET DÉPOUILLEMENT.

L'activité dans le canal était mesurée de part et d'autre du point d'immersion après différentes durées d'action du courant sur les fonds. La vitesse du courant était réglée afin de rester légèrement en-dessous de la vitesse critique de remise en suspension de la mixture fluide de kaolin et d'examiner uniquement le déplacement en masse du dépôt. Ce n'est qu'en fin d'expériences que les vitesses ont été progressivement augmentées afin de regarder les possibilités de mesurer l'érosion des fonds à partir d'une décroissance de l'activité globale.

Au total 18 balayages du canal ont été effectués au cours d'une expérience qui a duré moins de 2 h.

Pour chaque balayage les courbes donnant la répartition du nombre de chocs enregistrés en fonction de la distance mesurée de part et d'autre du point d'immersion ont été établies.

A partir de ces courbes on a tracé des diagrammes donnant :

- le déplacement, en fonction du temps, du point d'activité maximale (fig. 9);
- la décroissance de l'activité maximale en fonction du temps;
- l'activité aux différentes distances du point d'immersion du traceur;
- le pourcentage de l'activité restante; cette dernière courbe permettant de préciser les quantités de matériaux entraînés par les courants.

Résultats des essais.

Sous l'action d'un courant très faible, représentant une vitesse de frottement de 0,55 cm/s et une vitesse moyenne de 14 cm/s, on constate que le point maximal d'activité se déplace vers l'aval avec une vitesse d'environ 0,4 cm/mn; les fonds s'inclinent et prennent une pente d'environ 1/500, une partie de la vase située à l'aval débordant par-dessus le réceptacle tandis que la partie amont s'abaisse très faiblement.

En poursuivant l'essai pendant 1 h 30 avec une vitesse moyenne de 17 cm/s, le déplacement vers l'aval du point d'activité maximale continue à se faire sentir, mais avec une vitesse très faible de 1 mm/mn environ (fig. 10).

Parallèlement l'activité maximale diminue lentement, passant de 1.10^4 chocs/s à $0,5.10^4$ chocs/s en 2 h d'action du courant. Cette perte d'activité de 50 % caractérise un déplacement avec remise en suspension du traceur dont on ne trouve pratiquement pas de trace en extrémité du réceptacle de vase. Il faut également remarquer que le taux de décroissance de l'activité est peu différent lorsque l'on passe d'une vitesse de 17 cm/s à une vitesse de 19 cm/s.

Par contre, si l'on augmente encore la vitesse du courant pour atteindre 21 cm/s de vitesse moyenne ($U_* = 0,8$ cm/s) on assiste brutalement à une chute de l'activité qui passe en quelques minutes de 5 000 C/s à 1 000 C/s pour s'annuler après 15 mn d'action du courant. La vase a été remise en suspension en totalité lorsque la vitesse est passée de 19 à 21 cm/s (fig. 11).

Au cours de cette dernière phase on a d'ailleurs assisté à une augmentation de la pente des dépôts et à un retour en arrière de la masse de vase marquée par suite, vraisemblablement, du contre-courant qui s'est établi à la limite entre les fonds en dur du canal et les fonds de vase contenue dans le réceptacle.

Les conclusions que l'on peut tirer de cette expérience de déplacement des vases fluides sous l'action d'un courant ne permettent pas d'élaborer une loi sur les déplacements de la crème de vase. Le seul fait très net que l'on puisse en déduire est le seuil critique de remise en suspension et une légère tendance, au cours des premières heures d'expérience à un déplacement de la vase vers l'aval.

Par contre, cette expérience a permis de mettre au point une méthode de mesure du déplacement de la vase en utilisant un radio-élément de courte période. On a pu constater en particulier qu'il était possible :

- d'introduire, sans grande difficulté, sur un modèle, une vase marquée au sein d'une vase non active sans apporter de perturbation ou de contamination aux abords du secteur retenu;
- de suivre le déplacement de la vase marquée, ayant les mêmes propriétés physiques que l'ensemble de la suspension, en utilisant un appareillage électronique classique;
- d'obtenir des précisions sur la vitesse de déplacement de la vase marquée et d'en préciser le sens;
- d'interpréter les courbes de variation de l'activité afin d'essayer de mettre en évidence ou de préciser les lois de transport des vases.

En appliquant ce procédé de mesure, par les radio-éléments, il serait possible d'apporter certaines précisions sur les mouvements des vases dans un estuaire schématique ou de mesurer la vitesse de remontée des vases sous la houle que des mesures antérieures avaient pu mettre en évidence.

Etude en canal du transport et du triage des sables par des courants de turbidité de vase

Généralités.

Le transport d'éléments grossiers, et notamment des sables, par des courants de turbidité de vase (fig. 12 et 13) a déjà fait l'objet de recherches minutieuses en canal, par le L.C.H.F., en examinant les triages granulométriques su-

12/ Courant de turbidité de très faible concentration (photographie LCHF).

bis par des suspensions constituées par un mélange d'eau, de vase et de particules sableuses se propageant sous forme de courants de densité sur les fonds marins (L.C.H.F. - B.C.E.O.M., 1958, Etudes des courants de turbidité).

Ces recherches dans lesquelles rentraient un grand nombre de paramètres : concentration de la suspension en matières solides, pourcentages relatifs de vase et de sable, hauteur d'eau, volume de mixture utilisé, etc., s'étaient avérées très longues puisqu'elles nécessitaient, pour chaque expérience, d'avoir recours à des prélèvements très rapprochés répartis sur toute la longueur du canal, et de soumettre chacun de ces prélèvements à des analyses granulométriques pouvant porter sur une centaine d'échantillons. De plus, il était particulièrement difficile d'effectuer avec précision des prélèvements sous l'eau de dépôts imparfaitement consolidés.

Malgré ces difficultés, nous avons pu montrer qu'un courant de turbidité formé à partir d'une suspension homogène, de vase et de sable, de densité ρ_m , mise en contact avec des eaux claires sur une hauteur H , et soumis à une vitesse initiale de propagation.

$$V = K \sqrt{g' H}$$

avec :

$$g' = g \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho_m}$$

g' : accélération réduite de la pesanteur;

ρ_0 : masse spécifique de l'eau;

g : accélération de la pesanteur;

déposait les sables le long de son parcours, d'une part, avec un triage longitudinal, les éléments les plus fins étant entraînés le plus loin, d'autre part, avec un triage vertical, la « queue » du courant de turbidité étant chargée d'éléments plus fins que la tête.

Dans un autre domaine, les conditions d'apports sédimentaires par les courants de turbidité, dans les retenues de barrage, et les triages en résultant tant en nature que sur modèle réduit, étaient étudiées en détail.

Avec l'utilisation des radio-éléments, de nouvelles expériences sur les triages par les courants de turbidité allaient pouvoir être entreprises en canal, apportant avec toute la précision désirable, et dans un délai extrêmement réduit de quelques jours, des résultats qui auraient nécessité plusieurs semaines d'immobilisation des installations hydrauliques, de travail et, par là, de dépenses. De plus, cette méthode permettait non seulement de définir les quantités de sable transportées et déposées par différents types de courant, mais de préciser comment s'effectuait ce transport au cours de la propagation du courant.

Conditions expérimentales.

LE CANAL ET LES CONDITIONS SÉDIMENTOLOGIQUES.

Les essais ont été réalisés, comme les précédents, dans une vaste cuve vitrée inclinable de 12 m de longueur, 0,60 m de hauteur et 0,40 m de largeur, en extrémité de laquelle un réceptacle de 50 dm³, séparé du restant du canal par une vanne guillotine, contenait la suspension de vase et de sable à un niveau identique à celui de l'eau dans la cuve. L'ouverture de la vanne guillotine permettait de mettre brusquement en contact la suspension et l'eau pure, engendrant par suite de la différence de densité entre les deux fluides en présence, un courant de turbidité sur les fonds. Les différentes expériences ont été réalisées avec une hauteur d'eau sur les fonds de 0,35 m (fig. 14).

Cinq concentrations différentes de vase dans la suspension ont été expérimentées : 25 - 50 - 100 - 200 et 300 g/l et, pour chacune de ces concentrations, on a introduit une proportion constante de sable (10 % de la masse de sable) ayant respectivement les classes granulométriques suivantes : 60 à 100 microns, 100 à 200 microns, 200 à 315 microns. Une fraction de ce sable était constituée par un radio-élément ayant les mêmes caractéristiques granulométriques et de densité que les particules siliceuses contenues dans chaque classe granulométrique.

LE RADIO-ÉLÉMENT.

Le radio-élément utilisé était constitué par un verre à l'or activé ayant par conséquent une vie courte et une radio-toxicité modérée (Or 198 : 2,7 jours de période, groupe II B).

Pour chaque essai, la dose d'activité correspondait à environ 10 m. Ci (*) d'or 198 répartis sur 30 g de verre soit :

CLASSES GRANULOMÉTRIQUES EN MICRONS	NOMBRE DE GRAINS DANS 30 g	ACTIVITÉ D'UN GRAIN MOYEN EN Ci	ACTIVITÉ DES GRAINS LES PLUS RADIO-ACTIFS EN Ci
60 - 100	4,3 . 10 ⁷	2,3 . 10 ⁻¹⁰	4 . 10 ⁻¹⁰
100 - 120	6,5 . 10 ⁶	15 . 10 ⁻¹⁰	33 . 10 ⁻¹⁰
200 - 315	1,5 . 10 ⁶	66 . 10 ⁻¹⁰	120 . 10 ⁻¹⁰

L'activité du grain le plus radio-actif était donc inférieure à l'activité maximum admissible par grain soit 36 μ Ci. Par contre, l'activité totale nécessaire pour les 12 expériences dépassant l'activité maximale autorisée pour un établissement de classe III, correspondant au L.C.H.F. (120 m. Ci), les expériences ont été échelonnées afin que, compte-tenu de la décroissance au cours des temps de l'activité globale utilisée, la somme d'activité reste toujours inférieure à cette valeur. En fait on n'a jamais dépassé une activité globale supérieure à 60 m. Ci en échelonnant les essais sur douze jours.

Le radio-élément était introduit en extrémité de la cuve expérimentale, dans le réceptacle contenant la suspension de vase et de sable naturel, puis malaxé énergiquement par une agitation appropriée avant de mettre la suspension en contact avec l'eau pure par un levage de la vanne.

APPAREILLAGE DE MESURES.

Les mesures de l'activité dans le canal expérimental ont été réalisées à l'aide d'une sonde à scintillation (SRAT) placée verticalement, solidaire d'un chariot se déplaçant parallèlement au fond de la cuve avec une vitesse constante de 1 cm/s. Un repérage permettait de positionner très exactement la sonde au cours de son exploration sur toute la longueur de la cuve.

La sonde était collimatée de telle sorte que la surface détectée est celle d'un cercle de 7,50 cm de rayon (175 cm²).

Les impulsions sont recueillies sur une échelle double de comptage à impressions rapides (chaîne digitale) travaillant sur deux seuils d'énergie : 50 et 250 KeV.

Simultanément le signal est collecté par un enregistreur (chaîne analogique) ce qui permet de visualiser immédiatement la répartition du traceur dans le canal (fig. 14).

Des comptages de 3 s, séparés par 0,2 s d'arrêt sont sélectionnés.

(*) 1 Curie (Ci) correspond à 3,7 . 10¹⁰ désintégration par seconde.

ÉTUDE EN CANAL DU TRANSPORT ET DU TRIAGE DES SABLES PAR DES COURANTS DE TURBIDITÉ DE VASE
(Expériences LCHF)

14/ SCHEMA DE L'INSTALLATION

15/ TRIAGE PAR DES COURANTS DE DENSITE DE 25 g/l et 50 g/l

16/ TRIAGE PAR DES COURANTS DE DENSITE 100, 200, 300 g/l

17/ PASSAGE DU COURANT A POSTE FIXE

18/ REPARTITION DE LA MASSE DE SABLE EN % CUMULES
(correction faite de la fraction restant dans la cuve)

tionnés tandis que la sonde se déplace tout au long du canal à vitesse constante.

MESURES EFFECTUÉES ET DÉPOUILLEMENT.

Les mesures effectuées ont porté successivement sur :

- l'activité globale introduite initialement dans le réceptacle contenant la suspension de vase et de sable;
- la vitesse de déplacement du courant de densité et de ses caractéristiques géométriques (hauteur, forme...);
- la variation de l'activité en un point fixe du canal lors du passage du courant de densité;
- l'activité restant dans le réceptacle après départ du courant de turbidité;
- la répartition de l'activité sur la totalité du canal en fin d'expérience, cette répartition permettant de déduire la quantité de sable d'une granulométrie donnée transportée par un courant de densité formé à partir d'une suspension de concentration connue. Afin de limiter l'atténuation des rayonnements lors de la détection — ce qui permettait de limiter l'activité utilisée et d'obtenir une meilleure résolution sur la surface mesurée — le niveau de l'eau a été ramené lentement à 0,15 m.

En fin d'essai, les sédiments déposés et les radio-éléments étaient évacués dans une cuve située sous le canal inclinable et stockés pendant le temps nécessaire à la décroissance du traceur. Après nettoyage du canal une mesure de bruit de fond était effectuée sur toute sa longueur.

De plus, avant chaque essai la sonde était étalonnée. Afin de limiter le rayonnement diffusé qui « augmente » la surface mesurée par le détecteur, le dépouillement a été effectué sur le 250 KeV. Avec un tel seuil de discrimination (de 250 KeV) et pour la géométrie de détection et une hauteur d'eau de 0,15 m, on obtient par exemple 1 000 impulsions en 3 s pour 25 μCi répartis sur 175 cm^2 , ou encore pour 0,143 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$. Connaissant pour chaque essai la masse de vase radio-active et sa radio-activité, on peut, pour chacune des expériences relier le nombre d'impulsions à la quantité de sable radio-actif déposé en un point donné et sous une hauteur d'eau connue.

Le nombre d'impulsions mesurées en un point déterminé du canal subit, s'il y a lieu, différentes corrections, l'une dite correction « d'influence » dépend du taux d'activité situé immédiatement en aval du point de mesure, l'autre est une correction de « pertes au comptage » dès que le nombre d'impulsions est supérieur à 4 000 chocs/s. Il faut également déduire le « bruit de fond » lorsque ce dernier est sensible; en fait, au cours des expériences sur le transport des sables par les courants de turbidité, les valeurs de bruits de fonds étaient très faibles.

Le nombre d'impulsions est ensuite transformé en masse de sable radio-actif par unité de surface permettant, par intégration, de calculer la masse totale de sable activé réparti dans le canal, et de comparer cette masse à celle effectivement introduite dans le réceptacle au début des expériences.

Résultats des essais.

Les mesures réalisées en cours ou en fin d'expérience ont permis de définir les conditions de déplacement des particules de sable par les courants de densité, et leur répartition dans le canal. Des résultats qualitatifs pouvaient être obtenus instantanément grâce à l'enregistrement des activités à différentes distances du point de formation du courant de turbidité, et les valeurs réelles des granulométries de sable transporté ont pu être précisées quantitativement

après avoir dépouillé les indications numériques fournies par l'imprimante.

Les résultats obtenus en examinant, rappelons-le, l'influence de la concentration de la suspension en vase qui engendre le courant de densité et la granulométrie des sables incorporés à cette suspension sur les triages granulométriques montrent que :

- un courant de turbidité peut transporter des sables sur une certaine distance;
- la distance parcourue par les particules sableuses est d'autant plus importante que leur vitesse de chute (ou leur granulométrie) est faible;
- un courant de turbidité transporte d'autant plus d'éléments sableux que sa turbidité est élevée (fig. 15);
- la loi de décroissance de la quantité de sable transportée est la même que la loi de décroissance des vitesses de propagation du courant de turbidité;
- une coulée boueuse ne provoque pratiquement pas une décroissance de la quantité de sable transportée en fonction de la distance parcourue; le sable est transporté en masse sans triage appréciable (fig. 16);
- dans le cas des expériences la presque totalité du sable est transportée dans la tête du courant de densité (fig. 17).

A titre d'exemple, les pourcentages cumulés des différents types granulométriques de sables déposés par des courants de turbidité, de différentes concentrations, sont indiqués sur la figure 18 et dans le tableau ci-contre. Ces valeurs sont corrigées du pourcentage de sable restant dans le réceptacle.

Remarquons que l'on retrouve bien, en utilisant les traceurs radio-actifs pour étudier les conditions de transport et de triage des sables par les courants de densité, les résultats que l'on avait pu obtenir par les méthodes classiques du triage et de l'analyse des dépôts.

La grande différence entre ces deux méthodes réside dans le fait que l'on a pu obtenir, dans un délai environ quinze fois plus court, des résultats équivalents avec des traceurs radio-actifs, à ceux qui avaient été donnés par les méthodes classiques de la sédimentologie, en nécessitant de nombreux prélèvements suivis de séparation et d'analyses fastidieuses. De plus, la méthode des traceurs permet d'obtenir des résultats continus et numériques fournissant instantanément une idée qualitative des expériences et facilitant ainsi l'orientation des recherches.

Mesure de la sédimentation dans le chenal du Mahury à l'aide d'une jauge radio-active

Généralités.

L'accès au port du Degrad des Cannes sur le Mahury (Guyane française) est rendu très difficile par suite de la présence de fonds de vase qui s'étendent en mer sur plusieurs kilomètres devant l'embouchure. Dans l'état actuel la pente moyenne des fonds marins entre la côte et les profondeurs de — 10 m est de l'ordre de 1/1 000 et une barre de vase oscillant entre — 0,50 et — 1 m limite l'entrée au Mahury (fig. 19).

Pour obtenir un port suffisamment actif dans l'embouchure, il faut aménager un chenal à — 6 m au plafond permettant à des bâtiments de commerce de fréquenter ce secteur dans de bonnes conditions nautiques.

Pourcentages cumulés de sable déposé le long du canal

TURBIDITÉ (en g/l)	DIAMÈTRE SABLE (en microns)	DISTANCE PARCOURUE						
		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
25	60 à 100	31	53	70	83	91	96	98
	100 à 200	57	82	90	94	96	98	100
	200 à 315	75	92	98	100			
50	60 à 100	25	45	62	77	90	97	100
	100 à 200	35	60	80	92	97	100	
	200 à 315	57	80	89	94	98	100	
100	60 à 100	21	39	56	72	87	96	100
	100 à 200	21	41	60	79	95	100	
	200 à 315	30	51	70	89	96	100	
200	60 à 100	26	47	67	86	99	100	
	100 à 200	31	52	71	90	100		
	200 à 315	30	51	70	89	95	100	
300	200 à 315	95	100

19/ Vue générale du modèle du Mahury (photographie LCHF).

Après des mesures en nature, faites par le service des missions et le service sédimentologique du L.C.H.F., il s'est avéré qu'il n'était pas impossible de réaliser un tel aménagement en draguant un chenal dans un secteur où les évolutions des fonds sont faibles et où les courants sont bien orientés. Des études sur modèle réduit (1/800 en plan et 1/80 en hauteur) devaient permettre de préciser le tracé exact de ce chenal et les ouvrages éventuels nécessaires pour mieux canaliser les courants et obtenir l'auto-dragage maximum (fig. 20).

Parmi les mesures qui devaient être effectuées sur le modèle, la variation au cours du temps des dépôts dans le chenal était un élément important. Le taux de sédimentation a été évalué à la fin de chaque cycle annuel d'essais en compartimentant le chenal en portion de 0,50 m environ et en draguant sous l'eau, par pompage, les sédiments déposés dans chaque alvéole; le volume des sédiments déposés était calculé ensuite par empotement et pesée des mixtures extraites. Compte-tenu de la densité des dépôts en nature et sur le modèle, on déduisait ensuite l'importance de la sédimentation annuelle dans le chenal envisagé.

Cette méthode était d'ailleurs complétée par des mesures d'épaisseur, sous l'eau, de la vase déposée sur l'ensemble du modèle à raison d'un point de mesures tous les 10 cm.

Bien que très précises, ces différentes méthodes présentaient des inconvénients par suite de la durée nécessaire pour de tels relevés (deux jours de mesures à chaque essai) et du fait que l'on ne pouvait au cours d'un cycle suivre en continu l'évolution des fonds dans le chenal.

On a tenté alors, avec le concours du S.A.R. de Saclay, d'apporter une solution au problème en déterminant l'épaisseur de vase déposée par mesure de l'absorption des rayons gamma, émis par une source d'américium 241.

Il s'agissait non pas de résoudre le problème du Mahury mais de tenter de mettre au point une méthode de mesure qui faisait défaut et pourrait être utilisée ultérieurement sur d'autres modèles ou pour des mesures analogues en Laboratoire de Sédimentologie si un cas voisin devait se présenter.

Conditions expérimentales.

PRINCIPE DE LA MESURE.

Le principe de la mesure en continu de la quantité de vase se déposant dans un secteur particulier est basé sur l'absorption des rayons gamma de 60 KeV émis par une source d' ^{241}Am . La source active est enchassée dans le fond du modèle et la mesure des radiations est faite à l'aide d'une sonde à scintillation collimatée et située à une distance constante de la source (fig. 21). Cette sonde est rattachée à une chaîne de mesures Renatran mise au point au cours d'essais préliminaires effectués au S.A.R. de Saclay. Afin de prendre en compte l'influence de la variation de la hauteur de l'eau au-dessus des fonds sous l'effet de la marée un suiveur de niveau Hydrotechnica était couplé au dispositif et permettait d'effectuer les corrections nécessaires.

APPAREILLAGE DE MESURES ET ÉTALONNAGE.

S'agissant d'un prototype, l'appareillage de mesure utilisé était très complexe et comportait :

- une sonde munie d'un cristal de 1 pouce $\times$ 1 pouce et un photomultiplicateur 150 AVP. La haute tension de la sonde est fournie à partir d'un châssis ALS 343;
- un préamplificateur PPM 11 dont le gain est 5;
- un ensemble de détection Renatran composé d'un châssis d'alimentation Renatran C7AL11, un tiroir d'entrée discriminateur, un tiroir décade M6DI 11 per-

mettant l'impression automatique des résultats sur machine Addu par l'intermédiaire d'un châssis de commande d'impression automatique CCI889;

- une base de temps commandée par un ensemble de trois tiroirs composés d'un tiroir MHR 11 et de deux tiroirs M3DP 11 permettant de déterminer le temps de marche et le temps d'arrêt de l'ensemble.

Une étude préliminaire a permis de vérifier que l'absorption était uniquement fonction de la densité de matière entre la source et le détecteur. Par ailleurs, on a pu déterminer que l'on a une perte au comptage au-dessus de 40 000 chocs/s, que le seuil le plus favorable est de 10 KeV avec une haute tension fixée à 1 140 V et une distance optimale entre la source et le détecteur de 15 cm.

La source d'Américium utilisée avait une activité de 1 m.Ci; il s'agissait donc d'une source scellée du type SGA.

Un étalonnage préalable a été effectué tout d'abord en eau pure, afin de définir la variation du taux de comptage en fonction du niveau de l'eau; on obtient une variation linéaire du nombre de chocs en fonction de la hauteur d'eau, la décroissance du nombre de chocs étant de 2 200 C/s lorsque l'on surélève le niveau de l'eau de 1 cm (fig. 22). De même on a examiné l'influence de la variation de la concentration de vase sur le taux de comptage, la vase étant disposée à différentes densités sur une épaisseur constante de 7,3 cm; on constate que le nombre de chocs/s décroît linéairement lorsque la densité de la vase augmente passant, dans nos conditions d'expériences, de 22 000 C/s en eau pure à 18 000 C/s pour une suspension de vase ayant une concentration de 850 g/l. En ramenant la diminution du nombre de chocs à un poids de vase par cm^2 on a une décroissance de 4,7 C/s par mg/cm^2 de vase (fig. 23).

Afin de contrôler la stabilité de l'électronique, des mesures étaient réalisées en cours d'essais dans une cuve annexe contenant la source d' ^{241}Am de référence.

FONCTIONNEMENT DU MODÈLE.

Le dispositif de mesure des dépôts par méthode radioactive étant en place, des cycles d'essais comportant la représentation des phénomènes hydrauliques et sédimentologiques relevés en nature ont été réalisés. Le cycle de marée était réalisé avec quatre composantes et présentait donc des alternances de vive eau et de morte eau comme en nature avec une amplitude maximale de 3 cm environ et une période de 8 mn 19 s par marée. Le courant équatorial qui longe les côtes de Guyane était également reproduit ainsi que les différentes houles qui règnent en nature avec leurs variations de direction, période et amplitude. Les débits fluviaux étaient réalisés en amont du Mahury.

Les vases naturelles étaient schématisées sur le modèle par une vase argileuse très fine (0,85 micron), comportant 30 % d'éléments calcaire, 45 % d'illite et 25 % de kaolinite; cette vase avait subi au préalable un traitement chimique afin de lui conférer des propriétés physiques voisines, aux échelles de similitude près, de celles que l'on avait pu mesurer sur les vases du Mahury.

Résultats des mesures.

Les mesures ponctuelles de la sédimentation dans le chenal ont été suivies pendant plusieurs heures sans interruption ni du modèle ni de l'enregistrement.

Des difficultés sont apparues par suite d'un manque de

MESURE DE LA SÉDIMENTATION DANS LE CHENAL DU MAHURY A L'AIDE D'UNE SONDE RADIOACTIVE

(Expériences LCHF)

20/ SCHEMA DU MODELE MAHURY

21/ SCHEMA DE L'INSTALLATION

22/ VARIATION DU N^{bre} DE CHOCS/S EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'EAU 23/ VARIATION DU N^{bre} DE CHOCS/S EN FONCTION DE LA CONCENTRATION

24/ VARIATION DES DEPOTS EN COURS D'ESSAI

stabilité dans l'électronique rendant difficile la mesure de faibles variations d'épaisseur de vase et nécessitant de faire des corrections multiples.

Quoi qu'il en soit, une courbe de variation de la masse de vase déposée par unité de surface a pu être établie en fonction du temps et des paramètres hydrauliques (fig. 24). On a pu constater par cette méthode, d'une part la progression des dépôts qui atteignent en fin d'essais 400 mg/cm² représentant sur le modèle une épaisseur d'environ 2,7 cm (concentration moyenne des dépôts 150 g/l sur le modèle). L'influence des périodes de fortes houles a pu être mise en évidence, le taux de sédimentation au cours de cette partie des essais étant douze fois plus important que sous l'action des houles faibles. On a pu également constater que pour un régime de houle établi le taux de sédimentation était à peu près constant dans le chenal.

Par contre le manque de sensibilité de l'appareillage de mesure n'a pas permis de déceler avec une précision suffisante les variations de sédimentation au cours d'une marée, la précision des mesures pouvant être estimée à 3 mm près environ ($\pm 1,5$ mm).

Si l'on tient compte des moyens mis en œuvre on est tenté de dire que ce résultat est un échec. L'appareillage utilisé était, en effet, complexe, lourd, encombrant, nécessitant une immobilisation importante en personnel et paralysant partiellement le fonctionnement du modèle.

Par contre, si l'on pense que l'appareillage utilisé était déjà ancien et mal adapté aux performances que l'on voulait exiger de lui, il est possible d'imaginer, pour de prochaines expériences, que l'on pourra adapter une électronique portable transistorisée à ce problème.

Le principe de la mesure reste bon mais les moyens utilisés pour l'exploiter sont à mettre au point pour fournir aux utilisateurs un outil de travail bien approprié.

Etude de la variation de concentration dans un dépôt sédimentaire de vase en cours de tassement

Généralités.

L'étude des conditions de tassement des vases au cours du temps présente un réel intérêt pour tenter de s'opposer à leur consolidation dans un secteur déterminé ou, au contraire, essayer d'obtenir des dépôts suffisamment compacts, susceptibles de supporter des charges déterminées ou de ne pas subir d'érosion.

Dans une retenue de barrage, par exemple, il sera intéressant de définir la rapidité de consolidation de la vase devant un ouvrage de chasse afin de pouvoir manœuvrer les vannes avec le maximum de rentabilité. Dans un chenal de navigation, ou dans un port maritime, la connaissance des conditions de tassement des sédiments pourra être très utile pour tenter de s'opposer au dépôt par une bonne utilisation des courants ou, plus simplement, prévoir les moyens de dragages les plus appropriés à l'état de tassement des sédiments. De même, pour étudier les conditions de consolidation d'un remblai de vase et rechercher l'efficacité de certains procédés de drainage, de vibration ou d'électrodécantation sur le tassement, il est nécessaire de préciser la variation de la densité des dépôts au cours des temps.

Le L.C.H.F. avait abordé ces problèmes de tassement en examinant, d'une part, les variations de la concen-

tration moyenne de différents types de dépôts de vases en fonction du temps, d'autre part, en recherchant en fin d'expériences le gradient des concentrations sur toute la hauteur des dépôts.

Les résultats obtenus ont apporté de premiers enseignements sur les conditions de dépôt des sédiments péloïtiques en montrant, en particulier, que les variations moyennes de concentration étaient une fonction du logarithme du temps mais que les coefficients étaient différents suivant les phases de tassement : chute entravée des flocons ou particules, écrasement des flocons et élimination des eaux interstitielles, évacuation des eaux par porosité et puits de drainage, etc. Dans chacun de ces domaines les variations de la concentration T_s répondaient à l'expression :

$$T_s = \alpha \log t + \beta$$

α : facteur dépendant du diamètre des particules;

β : facteur lié au milieu aqueux.

A l'état final du tassement on constatait également que les variations de la concentration à l'intérieur des dépôts était approximativement de :

$$T_{s(h)} = T_{s(s)} + n \log H$$

$T_{s(s)}$: concentration en g/l à la surface;

H : profondeur en cm ($H > 1$ cm);

$T_{s(h)}$: concentration à la profondeur H ;

n : paramètre dépendant de la nature du complexe sol-eau.

Ces premiers renseignements, malgré tout leur intérêt, ne permettaient pas de répondre entièrement aux problèmes posés par le tassement des vases et il était nécessaire pour être plus précis de définir les gradients de concentration dans les dépôts aux différentes étapes de tassement.

Des essais effectués en utilisant des procédés de mesures de résistivité électrique dans les dépôts n'ont pas donné de renseignements suffisamment précis.

Par contre en faisant appel aux radio-éléments il a été possible « d'ausculter » les dépôts de vase au cours de leur tassement et d'apporter ainsi de nouvelles précisions sur les conditions de consolidation des sols immergés.

Principes de mesures. Conditions expérimentales.

PRINCIPE DE LA MESURE.

Le principe de la mesure est basé sur l'absorption de rayons gamma en fonction de la densité d'un complexe sol-eau (fig. 25).

Ce principe est déjà utilisé depuis plusieurs années dans différents dispositifs relativement complexes que l'on peut se procurer dans le commerce. Le nouvel appareillage mis au point pour étudier les gradients de concentrations dans un dépôt de vase en cours de tassement, ou plus simplement, examiner la densité d'un sol contenu dans une carotte de forage, a été orienté afin de s'adapter aux besoins et aux moyens d'un Laboratoire de Sédimentologie. En particulier le dispositif utilisait l'électronique classique servant aux détections sur le terrain, ou à l'étude de la radio-activité naturelle, et ne comportait que :

- une sonde à scintillation;
- un scintillomètre portatif (SPP 3);
- une échelle de comptage ou un enregistreur.

La source radio-active devant être utilisée pour ces expériences a été sélectionnée par le département des Radio-élé-

ÉTUDE DE LA VARIATION DE LA CONCENTRATION DANS UN DÉPÔT SÉDIMENTAIRE DE VASE EN COURS DE TASSEMENT
(Expériences LCHF)

25/ SCHEMA DE L'INSTALLATION ET APPAREILLAGE DE MESURES

26/ ABSORPTION DES RAYONS GAMMA EN FONCTION DE LA DENSITE DE LA VASE

27/ EXEMPLE DES GRADIENTS DES CONCENTRATIONS DE DIFFERENTS DEPOTS DE VASES OU LIMONS

ments (S.A.R. Saclay), afin de bien s'adapter aux recherches entreprises et permettre de déterminer des densités avec une bonne précision.

Différentes sources ont été étudiées : caesium (^{137}Cs), américium (^{241}Am), europium (^{155}Eu), baryum (^{133}Ba), etc.

L'europium 155 a été retenu comme offrant un bon compromis entre les différents aspects du problème. On a constaté en particulier que cet isotope (comme ^{133}Ba) donne une absorption indépendante de la composition de la vase; par ailleurs sa période de 1,8 an ne nécessite le remplacement de la source que tous les deux ou trois ans (fig. 26).

Avec cette source et le dispositif de mesures utilisé il était possible de déterminer les densités avec une sensibilité théorique de 5 g/l.

MONTAGE RÉALISÉ.

Les éprouvettes contenant les complexes sol-eau à étudier étaient des éprouvettes classiques en matières synthétiques transparentes d'un diamètre de 9 cm et de hauteurs variables entre 0,20 m et 4 m.

Ces éprouvettes étaient déplacées lentement ($V = 1 \text{ mm/s}$), entre la source radio-active et le détecteur. Pour cela la sonde à scintillation et le porte-source ont été rigidement fixés sur un banc optique de part et d'autre de l'éprouvette (fig. 25). Une précaution toute spéciale a été prise pour que les axes des diaphragmes de la tête de mesure et du porte-source soient dans un même plan et confondus, et que la distance entre ces deux ensembles soit rigoureusement constante (1/10 mm).

La partie sensible du détecteur est protégée par un colimateur en plomb de 3 cm d'épaisseur dans lequel une fente horizontale rectangulaire ($5,4 \times 1 \text{ cm}$) a été pratiquée. Face à ce diaphragme, le porte-source circulaire, également en plomb de 2 cm d'épaisseur, contient la source scellée du type SG 1 constituée par de l'europium 155. L'épaisseur du culot ainsi examinée est de l'ordre de 0,6 cm.

Le détecteur était relié au SPP 3 dont les impulsions étaient totalisées, dans le cas des expériences faites au L.C.H.F., par une échelle de comptage portative ECP 2 (SRAT). Le temps de comptage a été suivant le cas de 10 ou 100 s permettant d'éliminer l'erreur statistique de comptage. Le seuil de discrimination a été réglé sur 50 KeV.

MESURES EFFECTUÉES, INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS.

L'absorption des rayons gamma en fonction de la quantité de matière disposée entre la source et le détecteur, varie suivant une loi exponentielle.

Si l'on appelle N le nombre de chocs par seconde avec l'échantillon de vase et N_0 le nombre de chocs par seconde avec de l'eau pure, on a une relation linéaire de la forme :

$$\log 10 \frac{N}{N_0} = f(d)$$

avec d = densité du complexe sol-eau au niveau du diaphragme de mesure.

Après avoir établi une courbe d'étalonnage de la variation de $\log 10 N/N_0$ en fonction de la densité d de suspensions connues — courbe d'étalonnage qui comme il a été précisé est constante pour différents types de vases lorsque l'on utilise une source d'europium 155 — il suffit pour chaque essai de mesurer le nombre de chocs par seconde aux différents niveaux de la colonne de tassement.

Les mesures peuvent être réalisées par paliers successifs, l'éprouvette étant arrêtée à un niveau donné, ou au contraire être effectuées en continu, l'éprouvette se dépla-

çant lentement entre la source radio-active et le détecteur. Dans ce dernier cas on mesure une densité moyenne sur une hauteur de la carotte qui peut varier entre 1 cm et 10 cm suivant que l'on a pris une base de temps de 10 ou de 100 s.

Afin de contrôler l'électronique, une mesure préalable de l'absorption est effectuée dans l'eau qui recouvre le culot de tassement. Cette mesure permet également, lorsque l'on effectue les essais non pas sous l'eau pure, mais avec des eaux marines, de connaître la densité du milieu aqueux et d'apporter les corrections nécessaires à la densité pour en déduire la concentration en vase.

Résultats des essais.

Les mesures effectuées au L.C.H.F. en vue de définir les gradients de concentration dans des vases en cours de tassement ont porté sur différents types de sédiments provenant des régions du Marais Perdu (La Rochelle), du Mahury (Guyane), de la Loire, de la Gironde, de Fos ou constitués de particules péloïtiques de nature minéralogique connue telles que, par exemple du kaolin de la région de Provins ou des poudres calcaires impalpables.

Dans le cas des vases du Mahury (fig. 27), dont le diamètre moyen atteint 0,9 micron et les minéraux des argiles sont constitués à 60 % de kaolinite et à 40 % d'illite, on constate que, sur une éprouvette de 1,50 m de hauteur contenant initialement une suspension de vase à 70 g/l dans un milieu aqueux d'eau douce fluviale, on a :

- après 2 h de tassement une concentration à peu près homogène de 80 g/l sur toute la hauteur avec apparition d'un gradient de concentration sur les 20 derniers cm situés près du fond où la concentration passe de 80 à 150 g/l;
- après 1 jour, la hauteur du culot n'est plus que de 0,65 m. La concentration reste homogène jusqu'à 0,25 m du fond avec 130 g/l environ, elle croît ensuite très rapidement pour atteindre 190 g/l au contact du fond de l'éprouvette;
- après 4 jours, la hauteur du culot est de 0,45 m, la concentration en surface est d'environ 160 g/l, elle atteint 200 g/l à 20 cm du fond et dépasse 270 g/l au contact du fond de l'éprouvette;
- après 8 jours, la variation de concentration entre la surface et le fond est pratiquement linéaire, elle passe de 175 g/l en surface à 290 g/l au fond de l'éprouvette;
- il faut attendre 15 jours pour que le gradient de concentration entre la surface et le fond suive une loi exponentielle en fonction de la profondeur et que l'on retrouve une variation de la concentration T_s à une profondeur H en-dessous de la surface du culot de la forme :

$$T_{s(h)} = T_{s(s)} + n \log H$$

la concentration passe progressivement sur une épaisseur de 0,35 m de 160 g/l à plus de 320 g/l;

- la même constatation peut être faite après 70 jours de tassement et l'on obtient au voisinage des fonds des concentrations de 370 g/l alors qu'en surface la concentration reste relativement faible et de l'ordre de 225 g/l.

En partant d'une concentration initiale plus forte de 115 g/l on a pu constater que la répartition des gradients des concentrations au cours du tassement pouvaient présenter certaines anomalies :

- après 3 h de tassement, la concentration croît entre la surface et la demi-profondeur — où elle atteint son

- maximum avec 160 g/l — puis redécroît vers le fond;
- après 4 jours la concentration maximale se retrouve au $\frac{1}{4}$ de la profondeur, où elle atteint 210 g/l, puis redécroît vers le fond;
- il faut attendre 12 jours de tassement pour qu'apparaisse un accroissement de la concentration au voisinage du fond; après 20 jours, la variation de la concentration est très rapide sur les 10 premiers cm, puis croît linéairement ensuite avec la profondeur;
- progressivement le gradient prend une forme exponentielle au fur et à mesure que la durée du tassement augmente et après 70 jours, la concentration passe de 250 g/l en surface à 340 g/l au fond. Ici encore on constate que la concentration moyenne d'un culot de tassement, formé à partir d'une suspension initiale à très forte turbidité, est plus faible après une courte durée de tassement que celle que l'on aurait obtenu — dans les mêmes conditions expérimentales — en partant d'une suspension moins concentrée. Après une très longue durée de tassement, le phénomène serait inversé.

Toutes les vases ne réagissent pas comme celles du Mahury qui se tassent relativement lentement et restent fluides, aussi bien en nature que dans les éprouvettes de mesure, pendant de très longues durées. C'est ainsi qu'en étudiant par absorption gamma le gradient de concentration dans un culot d'argile de Provins, décantée depuis un an environ on a constaté que la concentration maximale pouvait atteindre 650 g/l au fond de l'éprouvette, passant, sur une épaisseur d'une vingtaine de centimètres, de 285 g/l en surface à plus du double en profondeur.

Sur des vases du Marais Perdu, au contraire, le gradient de concentration dans le culot de tassement restait très faible après deux ans de dépôt, dans une éprouvette de 2 m de hauteur. La concentration atteignait 340 g/l en surface et seulement 380 g/l au fond.

Avec les limons du golfe de Fos (diamètre moyen = 30 microns) le tassement des dépôts était extrêmement rapide. Après 30 mn de tassement une suspension ayant une concentration initiale de 350 g/l, répartie sur une colonne de 1 m de hauteur, donnait un gradient de concentration allant de 330 g/l en surface à 400 g/l à 20 cm du fond pour dépasser 1 000 g/l à 7 cm du fond. Après 24 h de tassement la concentration atteignait 400 g/l en surface (à 0,50 m du fond de l'éprouvette), 500 g/l au milieu du culot de tassement, et augmentait ensuite presque linéairement pour atteindre 1 350 g/l à 10 cm du fond de l'éprouvette.

Ces quelques exemples montrent les diversités que l'on

peut rencontrer dans les conditions de tassement des sédiments péloïtiques en fonction de la nature minéralogique et granulométrique du sol et de la composition du milieu aqueux.

L'utilisation d'une jauge de densité par absorption gamma permet d'apporter certaines précisions sur les variations de concentration dans les culots de tassement en fonction de l'âge des dépôts. La possibilité d'utiliser un appareillage électronique simple et classique et un isotope préalablement étudié par le département des Radio-éléments du C.E.A. pour être approprié aux conditions expérimentales, apporte aux Laboratoires de Sédimentologie un outil de travail particulièrement intéressant.

Les résultats des premières expériences faites au L.C.H.F., en utilisant comme source radio-active l'euprimum 155, montrent l'intérêt que l'on peut attendre de la mesure des concentrations aux différentes profondeurs des dépôts. En utilisant une source constituée de ^{133}Ba il serait possible de travailler sur des éprouvettes de plus grands diamètres et ^{241}Am permettrait dans certains cas, d'augmenter la précision des mesures si l'on devait étudier des séries d'échantillons de composition identique dans lesquelles les densités ne présentent que de petites variations.

Il faut toutefois, malgré les résultats encourageants obtenus au laboratoire, rester prudent dans l'interprétation des résultats. En particulier dans des vases contenant des quantités de matières organiques non négligeables, on risque d'avoir des formations de bulles de gaz à l'intérieur des culots de tassement et d'obtenir ainsi une diminution locale de la densité.

Conclusions

Ces différents exemples ne représentent qu'un échantillonnage des applications que les radio-éléments peuvent avoir dans un laboratoire de sédimentologie. Il est bien évident que l'éventail des investigations offertes par ce procédé est très vaste, en particulier dès qu'il s'agit de déplacement de deux types de sédiment différents soumis à des actions dynamiques. On peut penser que l'étude du déplacement des particules de sable au sein de la vase sous l'action de microvibrations pourrait être effectuée avec précision par l'emploi de traceurs radio-actifs. De même, toutes les lois des mouvements des vases sous la houle ou les courants seraient utilement contrôlées et précisées par ce nouveau procédé que les longues recherches faites par le département des Radio-éléments du C.E.A. ont mis à la disposition des hydrauliciens et des sédimentologues.