

**ÉTUDE DES
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DE DIFFÉRENTS SÉDIMENTS
TRÈS FINS ET
DE LEUR COMPORTEMENT SOUS DES
ACTIONS HYDRODYNAMIQUES**

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 22 mars 1968

PAR C. MIGNIOT *

Avant-propos

Les sédiments pélitiques du type vases, limons ou boues, contribuent fréquemment à réduire la rentabilité d'une installation, en imposant des travaux onéreux d'entretien, aussi bien dans une retenue de barrage, un chenal d'accès, un estuaire, un bassin portuaire ou une station d'épuration et de distribution des eaux.

Par contre, ces mêmes sédiments très fins, convenablement répartis, sont indispensables pour assurer au sol une structure favorable et augmenter ainsi la production des terres cultivables. Certains d'entre eux donnent la matière première à de nombreuses industries, dont celles de la céramique et peuvent rendre de grands services pour assurer l'étanchéité d'un terrain et protéger un chantier contre des infiltrations d'eau ou, au contraire, permettre d'emmagasiner dans des lacs artificiels ou dans les sous-sols des réserves d'eau importantes.

Qu'il s'agisse de lutter contre eux, ou de les utiliser, les connaissances minéralogiques, chimiques et granulométriques des particules élémentaires très diverses qui constituent ces sédiments péli-

tiques, ainsi que les caractéristiques du milieu aqueux qui les imprègnent, sont nécessaires.

Dans le cas de problèmes d'envasement, ces différentes analyses et leur interprétation sédimentologique, permettent de remonter aux origines quelquefois lointaines des matériaux, de suivre les transformations morphologiques et les altérations chimiques, ainsi que les conditions de mélanges des stocks en présence. Il est ainsi possible de localiser le ou les zones de production et d'orienter les mesures à prendre pour s'opposer aux causes mêmes de l'envasement.

Toutefois, cette première étude des sédiments très fins, aussi poussée soit-elle, reste insuffisante pour se faire une idée précise de leur comportement en nature sous les différentes actions hydrodynamiques, et il faut se rappeler que de *tels matériaux forment des complexes sol-eau essentiellement variables dans le temps*, ayant des propriétés physiques très différentes de celles de leurs particules élémentaires.

Contrairement aux sédiments granuleux, du type galets, graviers, sables, ou même silts, les « sédiments pélitiques », dans lesquels nous avons englobé tous les sédiments inférieurs à 30 μ , forment une multitude de « sols », dont le nombre peut varier à l'infini, suivant la nature des composants sédimentaires, le milieu aqueux dans lequel ils sont situés, l'état de « maturité » du dépôt et les

* Ingénieur, Chef du Service de Sédimentologie du Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

forces électrostatiques qui relient les particules entre elles. Que l'un de ces paramètres vienne à être modifié, et un nouveau sol se crée, réagissant différemment sous les actions hydrodynamiques.

Ce n'est qu'après avoir étudié en détail les propriétés physiques de tels complexes dans leur milieu naturel : floculation, structure et fragilité des flocons, vitesse de chute, charge électrique des particules... ou en cours de tassement sous l'eau ou à l'air, entraînant de profondes modifications dans leur état rhéologique, que l'on peut aborder les influences de différentes actions hydrodynamiques : courants, houles, écoulements par gravité, action du vent... et tenter, en toute connaissance de cause, de lutter efficacement et localement contre les phénomènes d'envasement.

Ces recherches sont également indispensables, lorsque l'on veut reproduire fidèlement sur les modèles réduits les phénomènes de sédimentation par les vases, car l'on doit alors rechercher un matériau « maquette » ayant — aux échelles de similitude près — des propriétés physiques analogues, subissant les mêmes variations dans le temps et présentant les mêmes déplacements sous les actions hydrodynamiques que le sédiment naturel.

Depuis plusieurs années, le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.) a eu l'occasion d'effectuer de telles recherches. Les travaux, tout d'abord orientés vers les applications immédiates des essais sur modèles réduits et l'interprétation des mesures océanographiques et hydrologiques, faites par nos missions d'études en nature, ont largement dépassé leur cadre initial. De l'ensemble des mesures effectuées en nature, ou en laboratoire, sur des vases d'origines très diverses : marine, estuarienne, fluviatile ou lacustre, ainsi que sur différentes boues provenant de résidus miniers et des poudres artificielles, un certain nombre de tendances générales ont pu se dégager, permettant de proposer — avec toute la réserve qu'impose la complexité des phénomènes — quelques lois empiriques et qualitatives reliant le comportement des sédiments pélitiques sous diverses actions hydrodynamiques à leurs propriétés physiques.

Après avoir rappelé le comportement des différentes particules élémentaires dans l'eau pure, nous examinerons successivement :

Les propriétés physiques des suspensions et dépôts de sédiments pélitiques en eau calme :

- floculation, vitesse de chute en milieu naturel, tassement,
- propriétés rhéologiques des dépôts à différents stades de tassement;

Les écoulements par gravité :

- pentes d'équilibre des dépôts immergés ou émergents,
- glissements, coulées et — par extension — courants de turbidité;

Le comportement des dépôts sous différentes actions hydrodynamiques :

- conditions d'érosion par les courants,
- mouvements des suspensions dans un estuaire schématique,
- action de la houle et des clapots de vent.

I. - Propriétés physiques des suspensions et dépôts de sédiments pélitiques en eau calme

1. Diversité des sédiments pélitiques étudiés.

Les études effectuées au Laboratoire ont porté sur des sédiments pélitiques ayant des origines et des compositions minéralogiques et granulométriques très variées :

- *origine marine* : Aiguillon, La Rochelle, Châteaillon, Conakry, Pointe-Noire, Bombay, Manguja, Kompong-Som;
- *origine estuarienne* : La Vilaine, Sèvre-Niortaise, Croix-de-Vie, Gironde, Mahury, Cayenne, Betsiboka, Parana;
- *origine fluviatile* : Durance, Seine, Rhône, la Vie, Zemrane, Sebou, Fodda, Hamiz;
- *origine lacustre* : Vaine, Léman;
- *résidus miniers ou de carrières* : Kerkour-Rhi (boue, phosphate), pulpe minéral d'uranium, argile de Provins, boue activée, poudres calcaires;
- *poudres artificielles* : kaolin technique, bakélite impalpable, poudre de polystyrène, poussières de charbon.

A titre d'exemple, nous indiquons dans le tableau ci-contre, la composition de certains des sédiments naturels, dont les propriétés physiques seront plus spécialement étudiées.

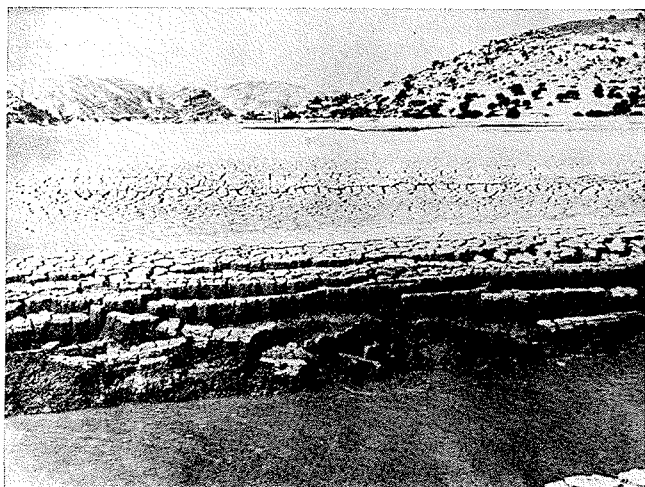
2. Comportement des particules élémentaires en eau calme.

Les particules élémentaires des sédiments pélitiques ont des dimensions et des formes très différentes, suivant leur composition minéralogique. Les mesures faites par microscopie électronique montrent, en particulier, que les éléments argileux peuvent avoir des dimensions comprises entre quelques microns et moins de $0,1 \mu$ et des formes allant des bâtonnets pour les palygorskites et les halloysites à des lamelles hexagonales pour les kaolinites et les hydromuscovites.

A l'état individuel, ces particules ont des vitesses de chute extrêmement faibles pouvant atteindre moins de $1 \mu/s$. On les caractérise fréquemment par un diamètre équivalent à celui d'une sphère de même densité et présentant la même vitesse de chute dans l'eau.

Cette méthode ne peut donner la dimension exacte de la particule, par suite de la forme même, qui peut être très différente, comme nous l'avons dit, de celle de la sphère. De plus, la particule en chute libre dans l'eau reste solidaire du film d'eau qui l'englobe et qui peut atteindre, dans certains cas, une épaisseur voisine de celle de la particule (épaisseur du film d'eau de 400 \AA pour une particule de kaolinite de $1\ 000 \text{ \AA}$ d'épaisseur). L'ensemble particule et eau liée a donc une densité très différente de celle prise pour la sphère équivalente.

Pour les fines particules, la vitesse de chute « W »

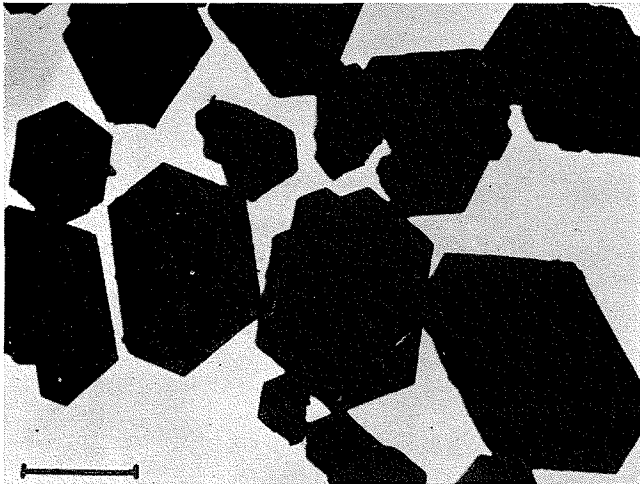


1/ Dépôts de vase dans une retenue de barrage algérien.
Mud deposit in an Algerian reservoir.

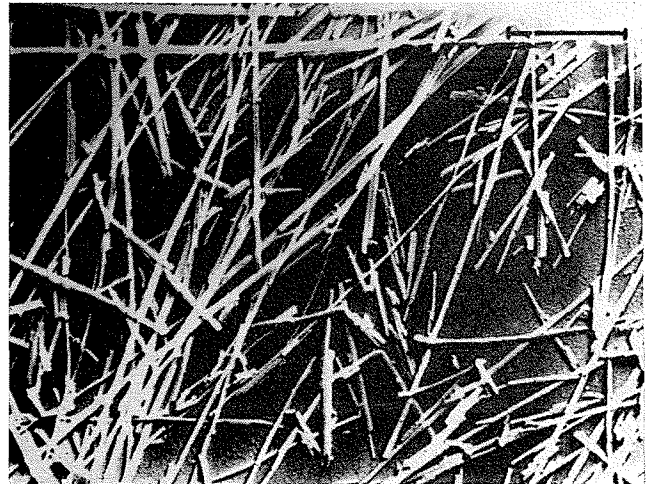


2/ Dépôts de vase à l'embouchure de la Sèvre Niortaise.
Mud deposit in the mouth of the Sèvre Niortaise.

ORIGINE	POURCENTAGES		MÉDIANE μ (Pélite)	ANALYSES CHIMIQUES			MINÉRAUX DES ARGILES
	Sable (%)	Pélite (%)		CaCO ₃ (%)	Mat. organ. (%)	Fe (%)	
Vase marine de L'Aiguillon	0	100	0,85	30	2	1,5	kaolinite. 35 % illite 65 %
Vase « La Rochelle »	2	98	0,45	25	4	1,6	illite, kaolinite.
Vase Conakry (Guinée)	0	100	0,15	20	1	6,0	kaolinite.
Vase estuarienne de La Vilaine	8	92	1,6	15	1,5	1,3	illite 50 % kaolinite 50 % traces de chlorite.
Vase estuarienne du Mahury (Guyane)	2	98	0,9	4	2,5	—	kaolinite 60 % illite 40 %
Vase fluviale de l'Oued Fodda (Algérie)	0	100	0,65	21	4,7	—	kaolinite 29 % illite 26 % montmorillonite 21 % chlorite 24 %
Vase de retenue de barrage du Hamiz (Algérie)	1	99	0,60	20	0,2	—	illite, kaolinite, chlorite, interstratifié; montmorillonite, illite.
Limon Durance (après tamisage).	—	100	11,00	20	—	—	poudre détritique, quartz, etc.
Argile de Provins (brute)	0	100	0,70	0	—	—	kaolinite.
Argile de Provins (séchée et broyée)	0	100	0,30	—	—	—	kaolinite.
Boue de Kerkour-Rhi.	2	90	0,35	60	—	traces	montmorillonite 70 % illite 30 % présence de phosphates.

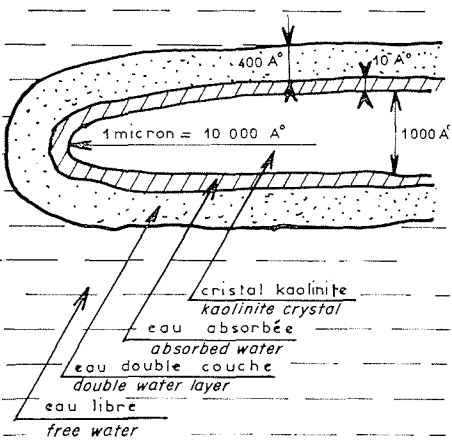


a/ Kaolinite hongroise / Hungarian kaolinite.

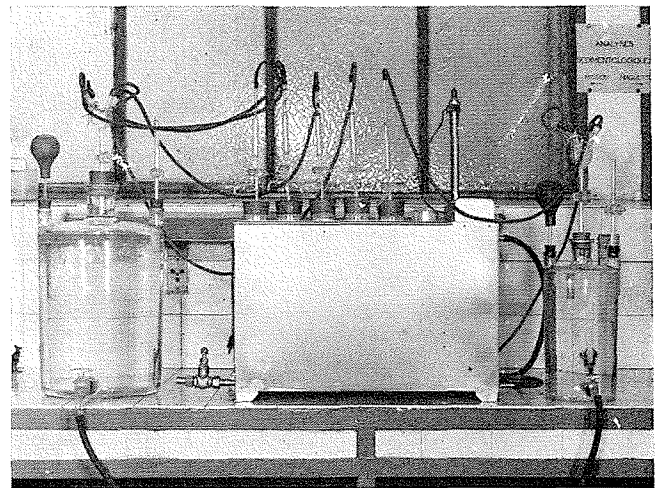


b/ Palygorskite / Palygorskite.

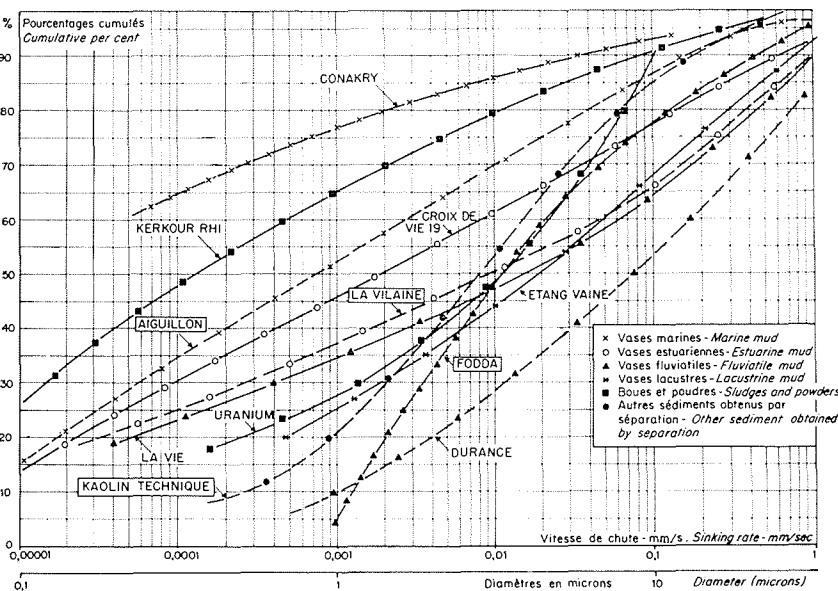
3/ Exemples de microscopie électronique (d'après B.C.F.A., 1960). Echelle 1 μ.
 Electronic microphotographs (from B.C.F.A., 1960). Scale 1 μ.



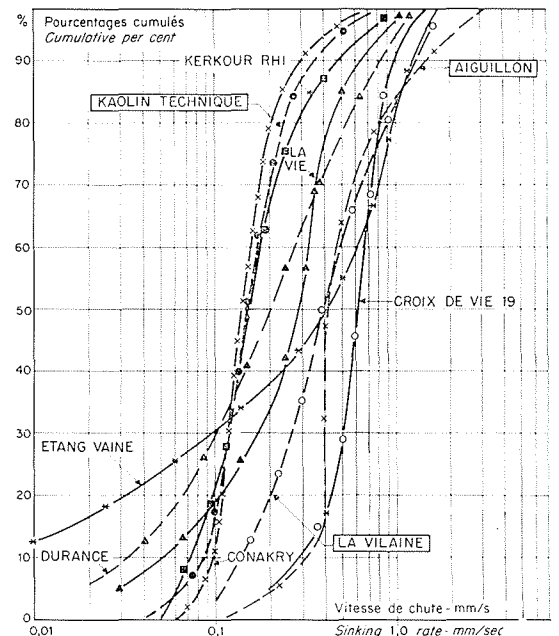
4/ Coupe schématique d'un cristal de kaolinite dans l'eau.
 Diagrammatic cross-section of a kaolinite crystal in water.



5/ Sédimentométrie. Batterie de pipettes d'Andreasen.
 A set of Andreasen pipettes for sediment measurement



a/



b/

6/ Exemples de courbes de vitesses de chute en milieu défloculant (6 a) et floculant (6 b).
 Examples of sinking rate curves for deflocculant (6 a) and flocculant media (6 b).

est liée au diamètre « *d* » de la sphère équivalente par la formule de Stokes :

$$W = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d^2 g}{\nu}$$

avec ρ_s masse spécifique de la particule;
 ρ_0 masse spécifique de l'eau;
 ν viscosité cinématique de l'eau.

On peut admettre, en première approximation, qu'en eau pure et à 20 °C ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), le diamètre équivalent d'une particule fine de densité 2,5 à 2,6 est égal à :

$$d \text{ (en } \mu) = W^{1/2} \text{ (en } \mu/\text{s)}$$

A titre d'exemple, une sphère de 10 μ de diamètre aurait une vitesse de chute de 100 μ/s .

Précisons que la viscosité de l'eau a une importance non négligeable sur la vitesse de chute, et qu'une légère modification de la température peut doubler cette viscosité :

à 30 °C : $\nu = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 et à 3,5 °C : $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

3. Floculation. Vitesses de chute des flocons.

Les vases, limons et boues sont constitués — comme nous l'avons vu précédemment — par un ensemble de particules élémentaires de dimensions et de nature très diverses, associés à différents sels. En suspension, dans les eaux naturelles, ces sédiments péltiques sont soumis, dans la plupart des cas, à des phénomènes de floculation et forment des agrégats, dont les vitesses de chute sont très supérieures à celles des particules élémentaires.

La faculté de floculation, et l'ampleur de celle-ci, dépendent d'un certain nombre de facteurs, les uns étant liés aux caractéristiques de la particule, les autres à celles du milieu aqueux.

D'une manière générale, la floculation est d'autant plus importante que l'on augmente la concentration électrolytique, la valeur des ions, la température, et que l'on diminue la dimension de l'ion hydraté, la constante diélectrique, le pH, le pouvoir d'absorption des anions.

Plus simplement, une suspension de vase, ou de boue, dans l'eau sera — dans certaines limites — d'autant mieux floculée que les particules élémentaires seront plus petites, leur concentration dans la suspension plus importante, et que le milieu contiendra davantage de sels floculants.

Les interactions entre ces facteurs conduiront à réduire les écarts entre les vitesses de chute en milieu aqueux floculant de particules péltiques ayant, à l'état individuel, des dimensions très différentes. C'est ainsi que des vases ou limons qui présentent, à l'état défloculé, c'est-à-dire à l'état de particules élémentaires individualisées, des vitesses de chute moyennes, comprises entre 10^{-5} mm/s et 10^{-1} mm/s (rapport des vitesses de chute de 1 à 10 000) auront, en eau de mer, et pour une concentration en particules solides de 10 g/l, des vitesses moyennes de chute de leurs flocons, comprises entre $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ mm/s}$ et $6 \cdot 10^{-1} \text{ mm/s}$ (rapport des vitesses de chute de 1 à 4).

A - Influence du diamètre des particules élémentaires sur la floculation.

Le facteur maximal de floculation :

$$F = W_{f \ 50 \%} / W_{d \ 50 \%}$$

défini comme étant le rapport entre la vitesse moyenne de chute libre des flocons ($W_{f \ 50 \%}$), dans un milieu aqueux floculant, et la vitesse moyenne de chute libre des particules élémentaires ($W_{d \ 50 \%}$), à l'état défloculé, varie comme l'inverse du diamètre équivalent (*d*) des particules élémentaires. Le facteur de floculation sera d'autant plus élevé que les particules seront plus petites.

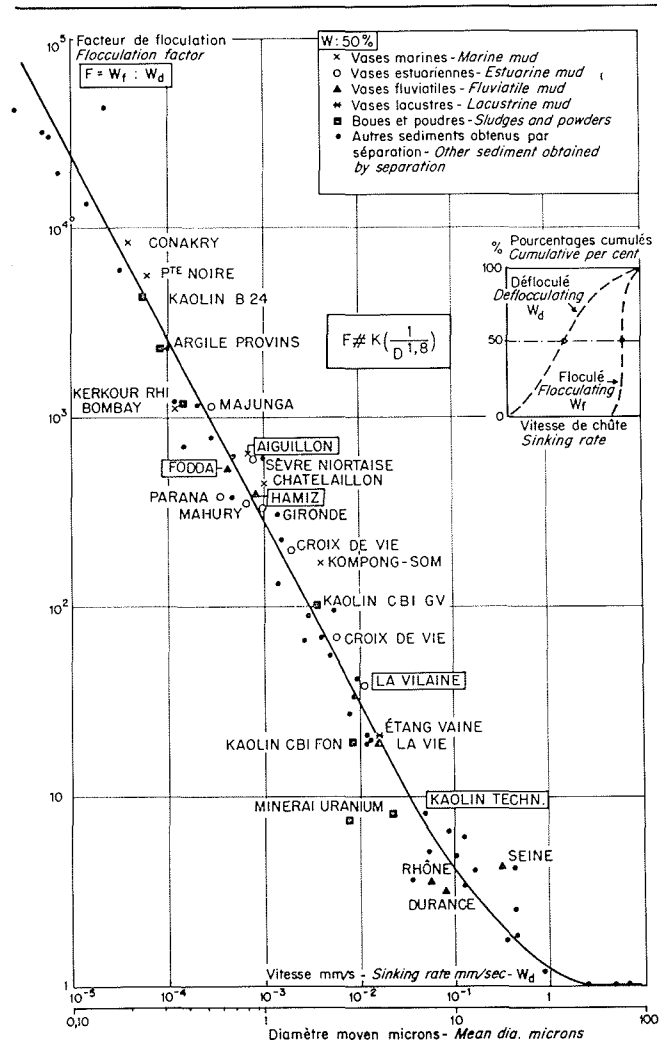
Pour une concentration de la suspension de 10 g/l de sédiments secs, et dans une eau de mer à 30 ‰ de salinité, le facteur de floculation est donné par l'expression :

$$F \approx 250 \cdot d^{-1,8}$$

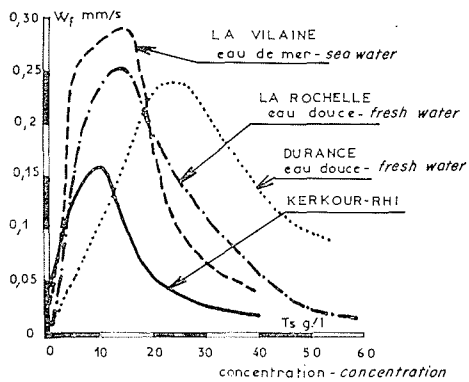
d étant le diamètre équivalent exprimé en micron ou, en exprimant F, en fonction de la vitesse de chute (W_d) des particules élémentaires :

$$F \approx 250 \cdot W_d^{-0,9}$$

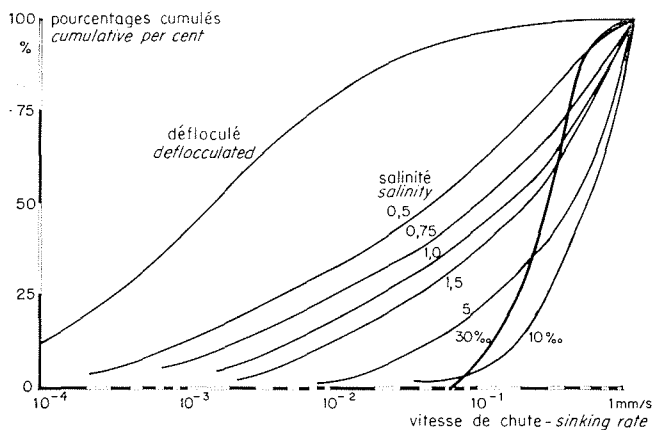
Cette loi empirique tend à montrer qu'en pratique, une suspension d'éléments péltiques mi-



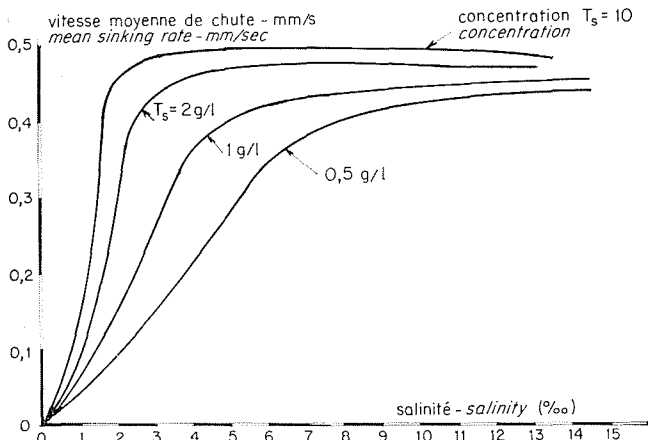
7/ Influence de la dimension des particules sur la floculation. Effect of particle size on flocculation.



8/ Influence de la concentration en particules solides sur la vitesse de chute des flocons.
Effect of solid particle concentration on floc sinking rate.



a/



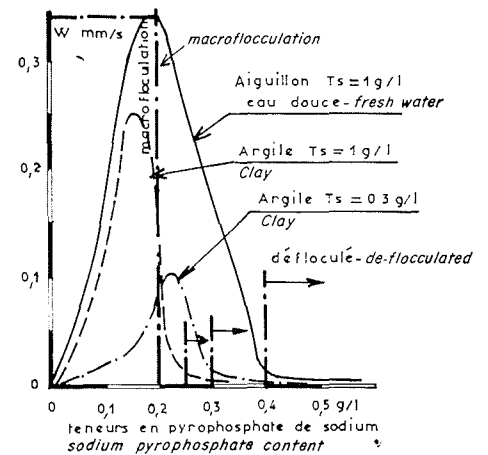
b/

9/ Influence de la salinité sur la vitesse de chute.
Effect of salinity on sinking rate.

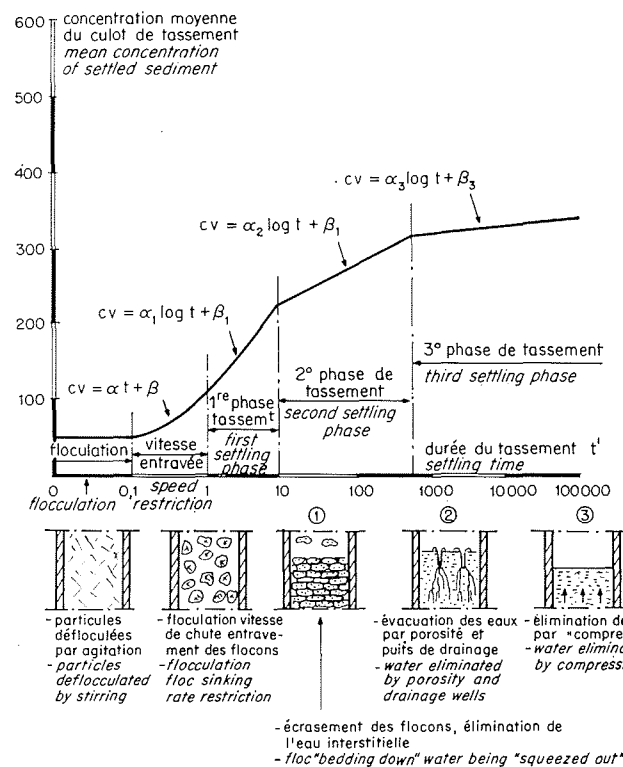
néraux, en milieu flocculant, présentera des vitesses moyennes de chute comprises entre 0,15 et 0,60 mm/s, quelle que soit la dimension des particules élémentaires. On constate, également, que la flocculation n'est plus sensible sur les particules minérales d'un diamètre supérieur à une trentaine de microns.

B - Influence de la concentration en particules solides dans la suspension.

La flocculation et la vitesse de chute des flocons sont très sensibles à la concentration de la suspension en particules solides. En milieu flocculant — qu'il s'agisse d'eau fluviale contenant des traces de sels ou d'eau de mer — le facteur de flocculation augmente progressivement avec la teneur en sédi-



10/ Influence du pyrophosphate de sodium (en eau de ville) sur la vitesse de chute
Effect of sodium pyrophosphate in town water on sinking rate



11/ Graphique montrant les différentes phases du tassement.
Graphical representation of bedding-down phases.

ments secs dans la suspension, jusqu'à un seuil critique de concentration voisin de 15 g/l.

À cette concentration, la vitesse de chute des flocons peut être dix fois supérieure à celle que l'on aurait pu mesurer sur des suspensions à 1 ou 2 g/l.

Par contre, au-delà du seuil critique de flocculation (15 g/l environ), la vitesse de chute des flocons devient entravée et tend à diminuer.

C - Influence du milieu aqueux.

Il suffit de quantités très faibles de sels flocculants (ou d'eau de mer) pour que la flocculation apparaisse. C'est ainsi que, si l'on introduit dans une suspension de vase à 2 g/l de sédiments dispersés dans de l'eau distillée, des quantités croissantes de sels

marins, on constate que les vitesses de chute des flocons contenus dans la suspension augmentent progressivement pour atteindre la valeur maximale à partir d'une concentration en sels de 2 ‰. Cette vitesse se maintient ensuite à une valeur à peu près constante, jusqu'à une salinité de 30 ‰ (eau de mer).

Par contre, si la concentration initiale de la suspension en particules solides est relativement élevée (10 g/l et plus), il peut se produire, pour de fortes salinités, une macrofloculation conduisant à une diminution des vitesses de chute (vitesses entravées); la vitesse de chute serait alors légèrement plus importante pour une salinité de 5 ‰ que pour une salinité de 30 ‰.

L'action de sels *déflocculants*, tel que le pyrophosphate de sodium, dans les suspensions de vase en eau douce fluviale, peut entraîner, suivant la quantité de sels introduits, des phénomènes très différents. En général, on note une macrofloculation avec apparition d'agrégats à structure lâche et gorgée d'eau pour de faibles quantités de pyrophosphate et une dispersion des sédiments pour de fortes concentrations (défloculation).

La stabilité, ou l'instabilité, d'une suspension de sédiments pélitiques, sous l'action des différents sels dissous dans les eaux, peut donc être très complexe, par suite de la modification de l'atmosphère ionique autour de la particule. Il sera possible d'utiliser cette action des sels dissous dans l'eau, sur la floculation ou la défloculation, dans les modèles réduits de vase, en ajustant le comportement des suspensions pour les mettre en similitude, par rapport à la nature. De même, le pH du milieu aqueux aura une grande influence sur les suspensions de particules très fines.

4. Tassement des sédiments pélitiques.

Décantés par gravité sur les fonds, les flocons de vase naturelle vont s'écraser sous leur propre poids et perdre progressivement une partie de leur eau de structure.

Leur réseau va se resserrer fortement, formant un matériau essentiellement variable dans le temps, par suite d'une élimination progressive de l'eau sous l'effet du tassement qui peut se poursuivre plusieurs années. Au cours de ce tassement, la vase présentera des états physiques très différents suivant son « âge » ou plus exactement sa teneur en eau. Liquide, visqueuse ou solide, cette même vase pourra prendre la consistance d'une véritable pierre après une dessiccation prolongée.

L'étude du tassement naturel de différents sédiments pélitiques montre que la concentration moyenne d'un dépôt varie comme le logarithme du temps avec différents domaines de tassement : vitesse entravée, élimination de l'eau interstitielle, drainage et porosité, état de compression.

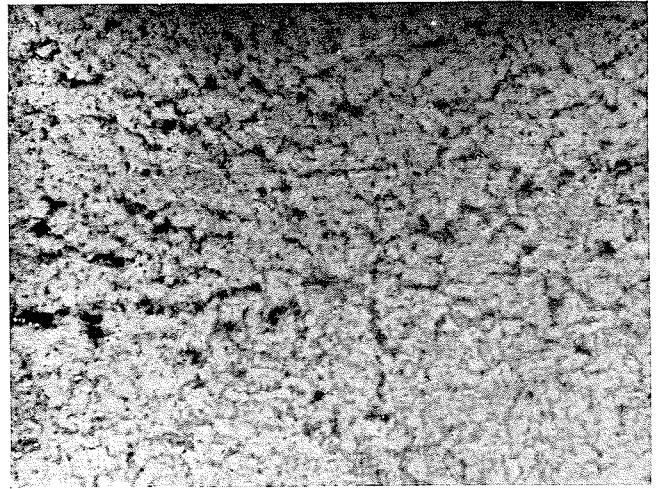
Dans ces domaines de tassement, la variation de la concentration T_s répond à l'expression :

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

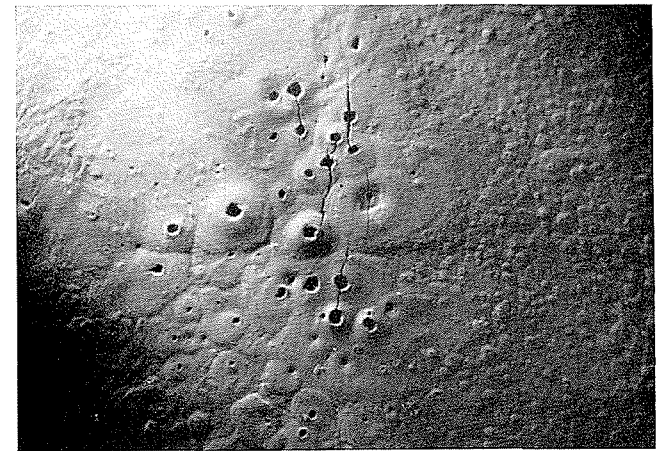
t est le temps (exprimé en général en heures);

α un facteur qui dépend principalement du diamètre des particules;

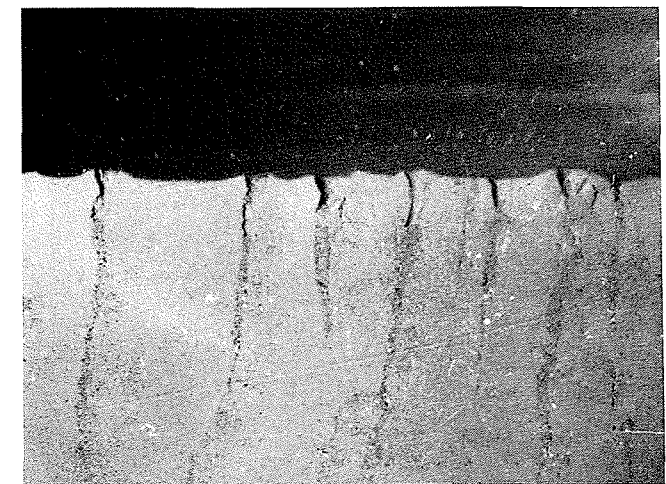
β un facteur lié au milieu aqueux.



12 a/ Flocons de vase en cours de tassement (première phase de tassement).
Mud floc during bedding-down (first phase).



12 b/ Puits de drainage observés dans la vase (deuxième phase de tassement); vue de dessus.
Drainage wells in the mud (second bedding-down phase).



12 c/ Coupe des puits de drainage.
Cross-section through drainage wells.

C. MIGNIOT

Rappelons que la densité d'un dépôt ρ_m/ρ peut être rattachée à la teneur en sédiments secs T_s (en kg/m^3 ou en g/l) par l'expression :

$$\rho_m/\rho = 1 + \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right) \left(\frac{T_s}{1000} \right)$$

où ρ_s la masse spécifique du sédiment en kg/m^3 , en général, voisine de 2500 kg/m^3 ;

ρ la masse spécifique du fluide en kg/m^3 , voisine de 1000 kg/m^3 pour l'eau.

On peut prendre en première approximation :

$$\rho_m/\rho = 1 + 0,6 \cdot 10^{-3} T_s$$

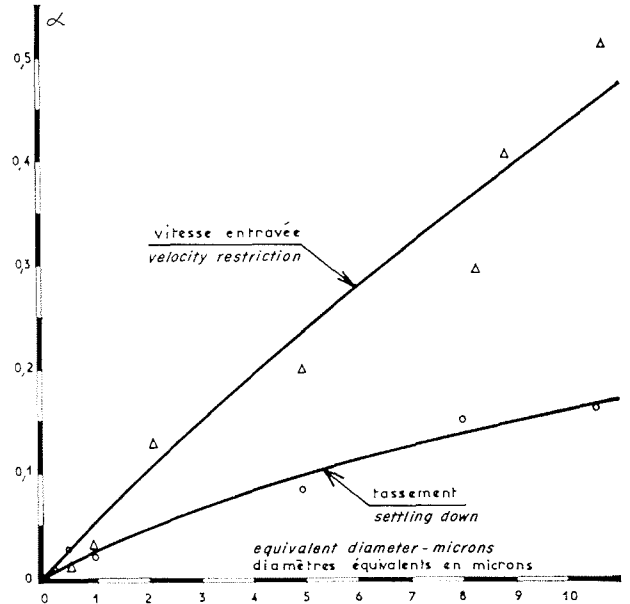
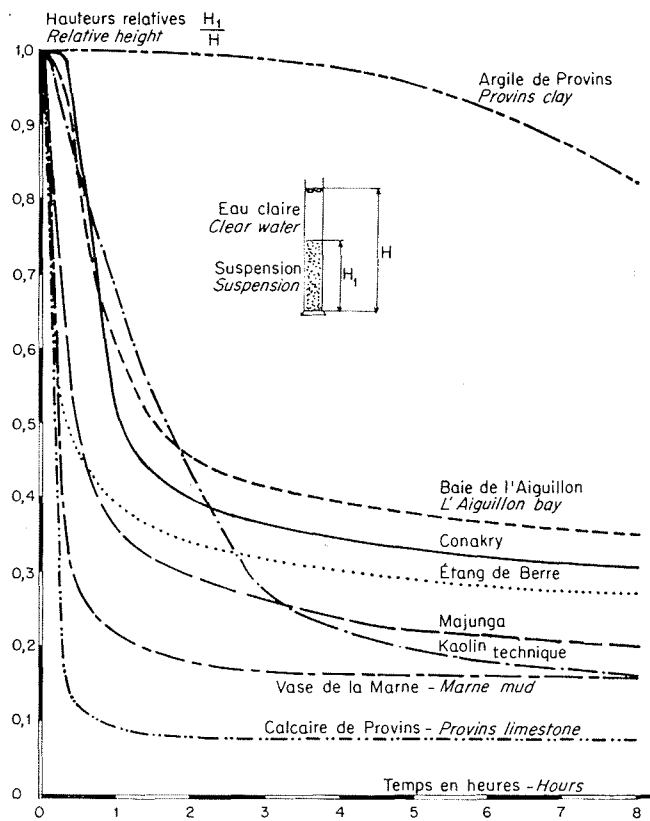
De même, la teneur en eau T_e , rapport entre le poids d'eau contenu dans le dépôt et le poids de sédiments secs, est rattachée à la teneur en sédiments secs T_s par la relation :

$$T_e = \left(\frac{1000}{T_s} - \frac{1}{\rho_s} \right)$$

A - Influence de la nature et de la dimension des particules.

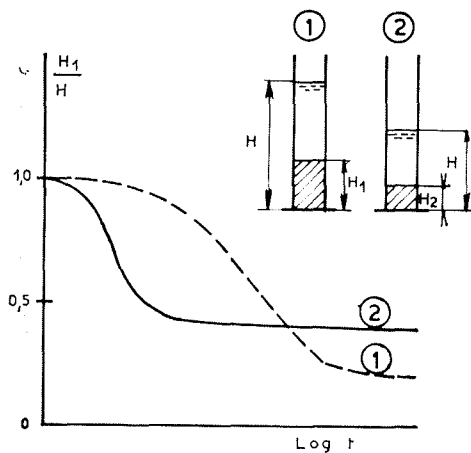
La nature des sédiments : dimensions, formes, charges électriques... aura une grande influence sur le tassement de sédiments pélitiques.

Après un mois de tassement, les couches super-

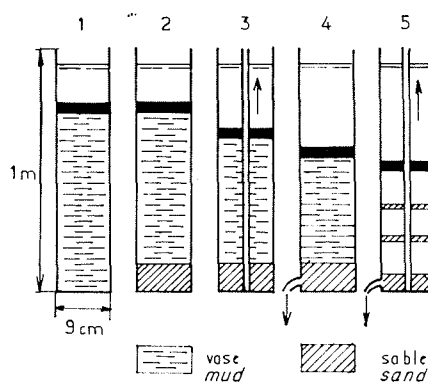


14/ Variation de la constante α en fonction du diamètre des particules.
Constant α vs. particle diameter.

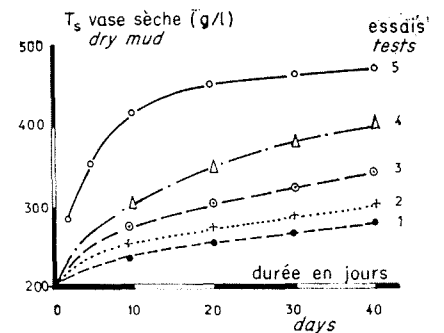
13/ Comparaison des courbes de tassement de différents vases.
Settling curves for various forms of mud.



15/ Influence de la hauteur initiale du dépôt sur le tassement.
Effect of initial deposit depth on bedding-down.



16/ Influence de couches alternées de vase et de sable sur le tassement.
Effect of alternating mud and sand layers on bedding-down.



ficielles de vase pourront présenter des concentrations très différentes dont le tableau ci-après donne un aperçu :

PROVENANCE	CONCENTRATION (en g/l)
Limons Durance	900
Calcaire (Poudre)	680
Kaolin technique	625
Vases naturelles :	
— Majunga	480
— Conakry	330
— La Rochelle	320
— Mahury	350
Boue Keřkour Rhi	250
Argile Provins	180

Il semble que le facteur α , de l'équation du tassement, augmente proportionnellement au diamètre moyen des particules élémentaires contenues dans le dépôt. Précisons qu'après centrifugation, les culots de tassement pourraient atteindre 1 000 à 1 200 g/l.

B - Influence de la hauteur initiale du dépôt.

Un dépôt de sédiment péltique tend vers une asymptote de tassement d'autant plus rapidement que l'épaisseur initiale du dépôt sera plus faible. Par contre, la concentration finale du culot sera d'autant plus importante que la hauteur du dépôt sera plus grande.

C - Influence du milieu aqueux.

Le milieu aqueux ne modifie pas très fortement la concentration moyenne d'un culot de tassement. Il apparaît cependant que pour certaines vases le tassement est plus faible en eau de mer qu'en eau douce fluviale.

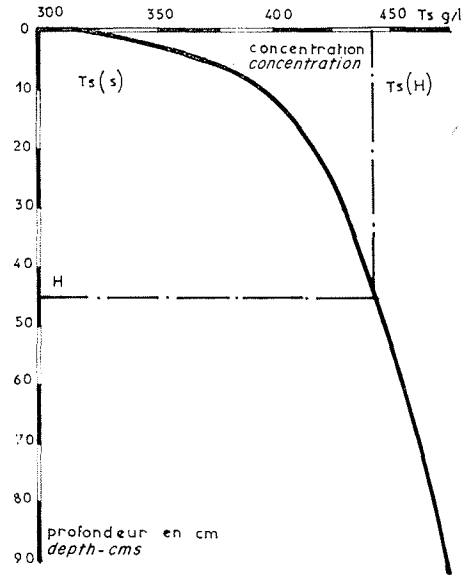
D - Influence de mélanges sable-vase.

Dans un mélange homogène de sable et de vase, le tassement peut s'effectuer soit avec ségrégation, si la concentration initiale de la vase est peu importante, soit uniformément si le dépôt a une concentration initiale supérieure à 250 g/l. Dans ce dernier cas, une augmentation du pourcentage de sable ne conduit pas à une augmentation de la rapidité de consolidation de la vase dont la teneur propre en eau reste constante après un temps déterminé, quelle que soit la quantité de sable introduite (inférieure à 30 % de l'échantillon).

Par contre, le tassement d'un dépôt constitué de couches alternées de vase et de sable sera plus important qu'un dépôt de vase seule (ou d'un mélange de sable et de vase) si la ou les couches de sable peuvent être drainées latéralement ou verticalement.

E - Gradient de concentration à l'intérieur des dépôts.

Après un tassement prolongé, il existe à l'intérieur des dépôts un gradient de concentration entre la surface et le fond.



17/ Exemple de gradient de concentration (vase du Mahury).
An example of a concentration gradient (Mahury mud).

D'après les résultats obtenus en laboratoire, et sur des éprouvettes ayant des longueurs comprises entre 0,5 et 4 m, la loi de variation de la concentration à l'intérieur des dépôts est approximativement de la forme :

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

- avec $T_{s(H)}$ concentration en g/l à la profondeur H sous le niveau du sol;
- H profondeur en cm ($H \geq 1$ cm);
- $T_{s(s)}$ concentration en g/l à la surface du dépôt;
- n paramètre dépendant de la nature du complexe sol-eau.

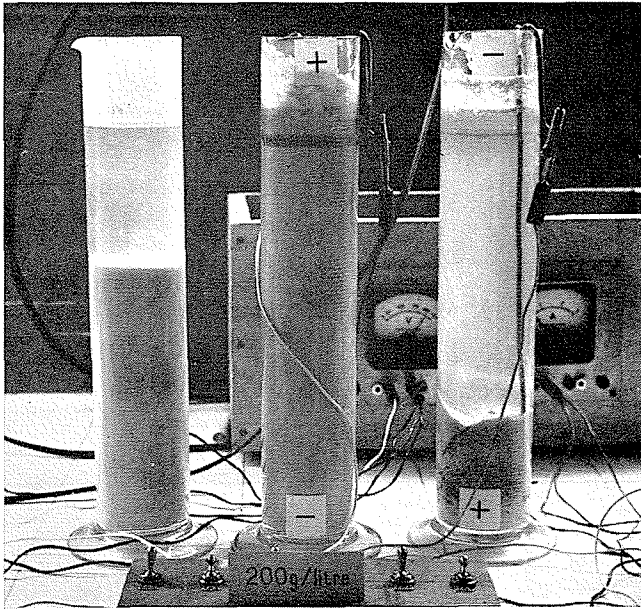
Pour des vases marines, n'ayant subi qu'une élimination ascendante des eaux, les valeurs du coefficient « n » sont comprises entre 50 et 80. Une vase présentant en surface une concentration de 320 g/l aurait donc une concentration de 370 à 400 g/l à 0,10 de profondeur, de 420 à 480 à 1 m et de 470 à 560 g/l à 10 m.

En nature, les alternances des couches sédimentaires, le rythme de sédimentation, les actions mécaniques externes (microséismes ou autres) apporteront de fréquentes modifications à cette loi.

F - Modifications du tassement.

Le tassement d'une vase peut être modifié soit, comme il a été dit précédemment, en augmentant son drainage (drains de sable ou drains artificiels), soit par utilisation de produits chimiques (ions phosphates en particulier) ou par des procédés électriques.

Des études faites au L.C.H.F. ont montré qu'il était possible en agissant simultanément par les phénomènes d'électrophorèse (attraction des particules à l'anode) et par les phénomènes d'électroosmose (attraction de l'eau à la cathode) d'obtenir en quelques heures une concentration du culot, deux fois plus importante que celle que l'on aurait pu



18/ Tassement des vases par électrodécantation.
Electrical bedding-down of mud.

avoir après un an de tassement naturel. Dans le cas de la boue de Kerkour-Rhi, la consommation électrique atteignait 14 kWh par mètre cube de boue traitée et l'on obtenait des valeurs sensiblement plus faibles pour traiter les vases du barrage d'Iril Emda; par contre, le tassement par électrodécantation des sédiments de Bombay entraînait des dépenses en courant électrique hors de proportion avec la rentabilité de l'opération.

Si l'on intervertit le sens du courant, il est possible au contraire de freiner le tassement et de maintenir pendant plusieurs jours des vases à l'état parfaitement fluide; cette action n'est valable que pendant une certaine durée, au-delà de laquelle le phénomène s'inverse.

5. Etude des propriétés rhéologiques des vases.

Dans le domaine de la rhéologie des vases, on devra se souvenir que les suspensions d'éléments péliques, dans différents milieux aqueux, suivent

des lois différentes, suivant leur état de tassement ou, ce qui revient au même, suivant leur concentration.

Une suspension de vase pourra être newtonienne aux faibles concentrations ou, au contraire, se rapprocher des fluides schématisés par les lois de Bingham ou de Casson, pour des concentrations de plus en plus fortes. De plus, les dépôts de sédiments péliques pourront présenter, pour certaines concentrations, des phénomènes de thixotropie caractérisés par une modification de leurs propriétés sous une action mécanique extérieure : brassage, vibrations...

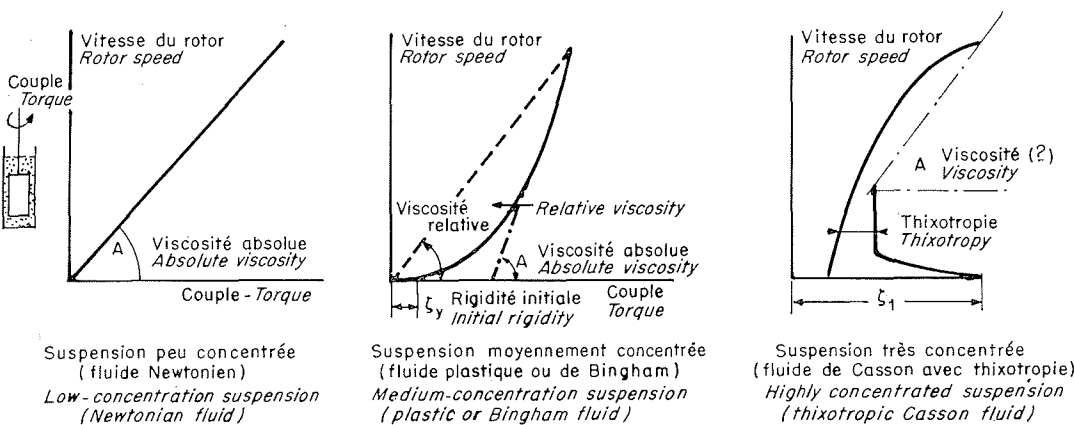
Les mesures de viscosité ou de rigidité initiale (*yield value*) sont donc extrêmement délicates et les valeurs peuvent être sensiblement différentes suivant les conditions expérimentales. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec prudence et restent — avec les types d'appareils que nous avons utilisés, c'est-à-dire des viscosimètres à corps tournants Eprecht à quinze vitesses et Brookfield LVT à huit vitesses — beaucoup plus comparatifs que quantitatifs. Des mesures en conduites, dont nous avons entrepris l'étude, apporteront vraisemblablement des précisions dans ces valeurs.

On peut, toutefois, penser, si des suspensions ou des dépôts présentent pour des mêmes concentrations en particules et des mêmes conditions expérimentales, les mêmes valeurs de viscosité relative et les mêmes valeurs de rigidité initiale et que si, de plus, leurs courbes rhéologiques respectives, de variation de cisaillement en fonction de la vitesse d'un rotor immergé dans la suspension, sont comparables, que ces suspensions auront les mêmes propriétés physiques, c'est-à-dire les mêmes caractéristiques de fluidité, de plasticité ou de cohésion.

Précisons que les mesures ont été faites en laissant la vase se consolider autour du rotor du viscosimètre afin d'éviter des remaniements importants des dépôts.

A - Influence de la nature des sédiments péliques.

A concentration en particules solides égale, la viscosité et la rigidité initiale d'une suspension ou d'un dépôt, pourront être très différentes suivant la nature des sédiments. Il semble que les éléments de plus faibles diamètres aient les plus fortes rigidités.



19/ Exemple de différentes courbes rhéologiques obtenues sur des suspensions de vase.
Example of rheological curves for various mud suspensions.

En eau douce et pour des concentrations T_s de 250 et 500 g/l les rigidités mesurées sur différents vases présentent les valeurs suivantes :

ORIGINE	T_s	
	250 g/l	500 g/l
	Rigidité dynes/cm ²	
La Vilaine	18	500
Marais perdu	11	200
Mahury	6,5	200
Argile Provins	6	135
Aiguillon	5	100
Kerkour Rhi	2,5	65
Hamiz	0,75	20
Calcaire	0,02	0,35

1 dyne/cm² = 0,1 N/m² = 0,1 pascal = 0,001 g/cm² = 10⁻⁶ bar

B - Influence de la concentration en particules solides.

La rigidité initiale d'une vase ou d'une boue (déterminée par mesure du couple nécessaire pour entraîner un cylindre immergé dans le dépôt) augmente très rapidement avec la concentration. On peut estimer, en première approximation, que la rigidité τ_y varie comme la quatrième ou cinquième puissance de la concentration T_s :

$$\tau_y \approx nT_s^4$$

n est un facteur qui dépend du complexe sol-eau.

La viscosité relative varie lentement avec la concentration pour des valeurs inférieures à 200 g/l et très rapidement au-delà. On retrouve ici encore une loi d'accroissement de la viscosité proportionnelle à la quatrième puissance de la concentration en particules solides dans la suspension.

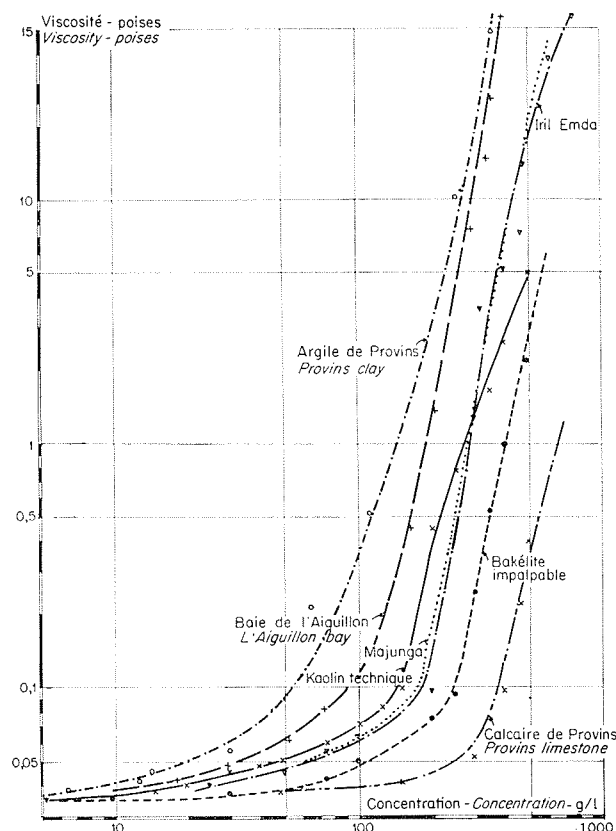
C - Influence du milieu aqueux.

La rigidité initiale et la viscosité relative sont, à concentration égale en sédiments secs, plus grandes en eau de mer qu'en eau douce fluviale; la rigidité peut être 1,4 à 1,7 fois plus grande en milieu marin qu'en milieu fluvial. L'accroissement de rigidité est surtout rapide entre 0 et 5 ‰ de salinité et varie peu au-delà.

Au contraire, la rigidité initiale peut être considérablement diminuée si l'on ajoute des doses adéquates de sels défloculants et la vase peut passer d'un état solide à un état fluide. Un dépôt de kaolinite a, par exemple, une rigidité réduite dans un rapport de 1 à 10 lorsque l'on introduit 5 g/l de pyrophosphate de sodium dans la suspension. Par contre, l'adjonction de doses plus faibles (0,5 g/l) de pyrophosphate peut avoir un phénomène inverse et entraîner une augmentation de la rigidité des dépôts. Le traitement des suspensions de vases ou de boues, par des sels chimiques, pour modifier leurs propriétés rhéologiques doit donc être réalisé avec discernement, en particulier lorsque l'on tente d'ajuster sur un modèle le comportement d'un matériau pélitique devant représenter, aux échelles de similitude près, les sédiments naturels.

D - Influence de différents pourcentages de sable dans des dépôts de vase.

La rigidité initiale d'une vase diminue lorsque l'on ajoute du sable si l'on raisonne en concentration globale (vase + sable). Par contre, si l'on étudie la variation de la rigidité initiale en fonction du pourcentage de sable introduit dans une vase de concentration donnée (ou de teneur en eau donnée), on constate qu'entre 0 et 30 % de sable fin la rigidité initiale n'est pas modifiée par le sable. Par exemple, si l'on introduit 25 % de sable d'un diamètre de 0,25 mm, dans une vase du Mahury ayant une concentration initiale de 385 g/l, on obtiendra un sédiment ayant une concentration globale de



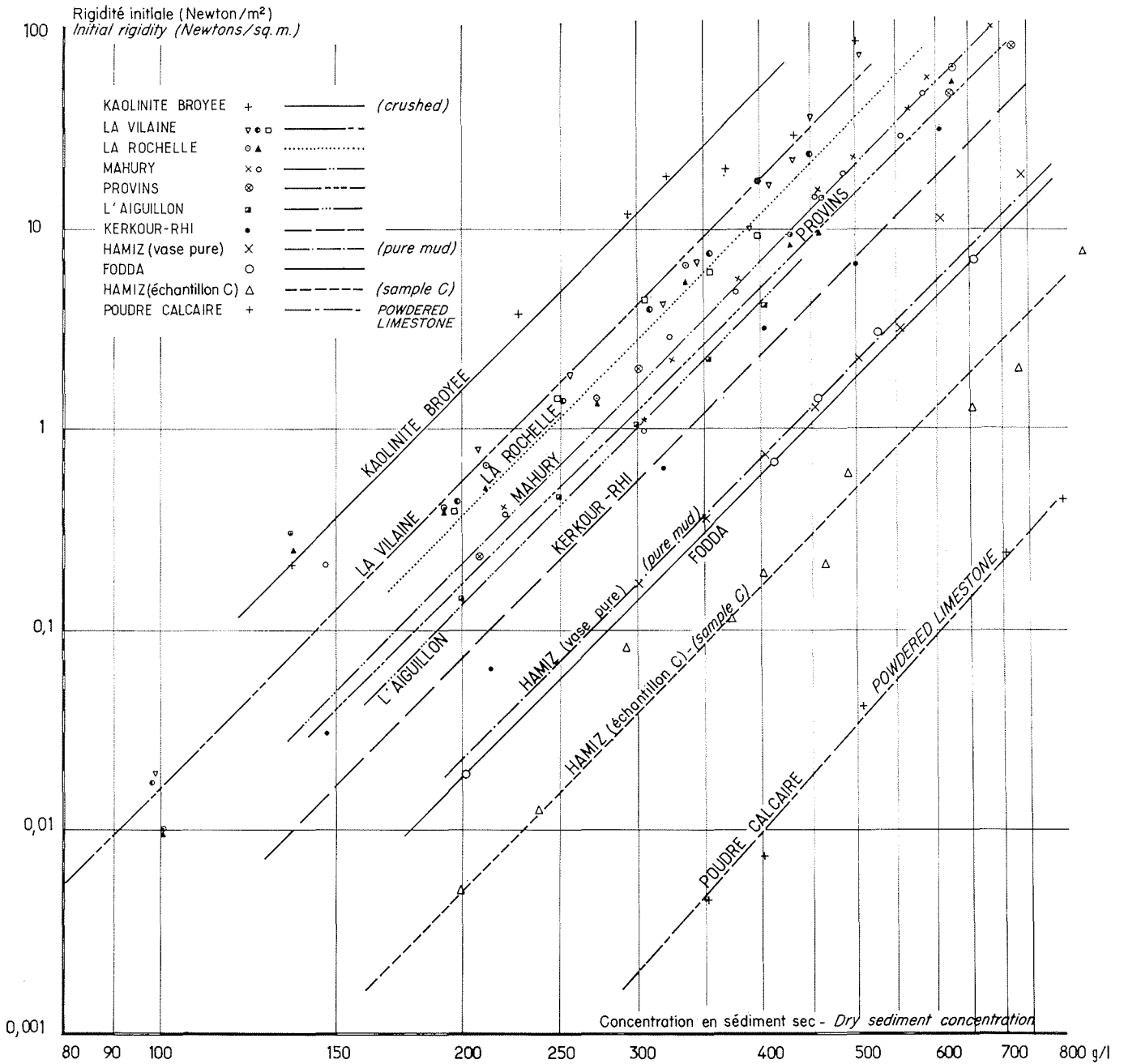
20/ Comparaison des courbes de viscosité relative de différentes vases. Relative viscosity curves for various muds.

456 g/l dont la rigidité restera identique à celle de la vase initiale (60 à 65 dynes/cm² dans le cas indiqué).

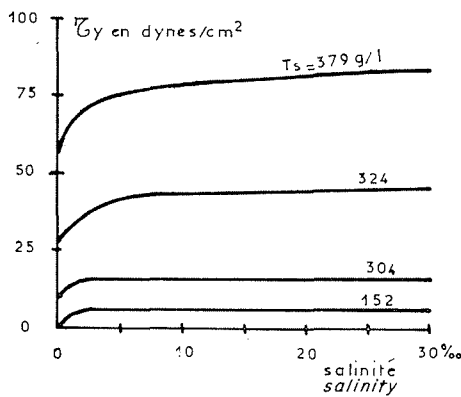
Ces résultats tendraient à prouver que dans une vase sableuse, seule la teneur en eau de la vase intervient dans la rigidité initiale du dépôt. Les études faites sur l'érosion des vases sableuses par les courants confirmeront cette hypothèse.

E - Modification des caractéristiques rhéologiques d'une vase par une action mécanique.

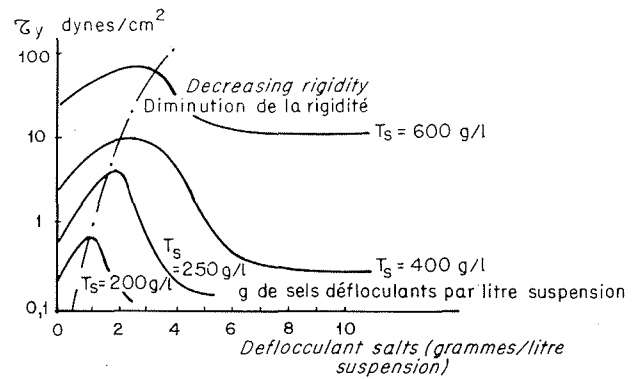
Pour certains domaines de la concentration des dépôts de sédiments pélitiques, la rigidité et la viscosité sont considérablement diminuées par une action mécanique (brassage ou vibration). Des



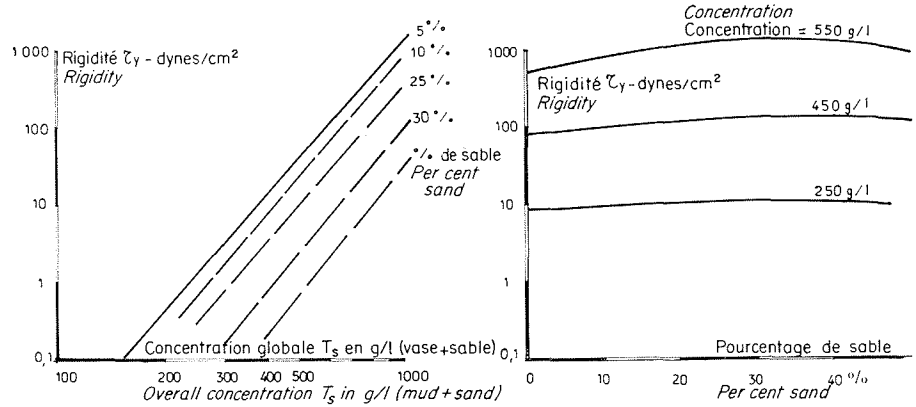
21/ Variation de la rigidité initiale en fonction de la concentration.
Initial rigidity vs. concentration.



22/ Influence de sels flocculants sur la rigidité initiale d'une vase.
Effect of salinity on initial mud rigidity.



23/ Influence de sels défloculants sur la rigidité d'une vase.
Effect on deflocculant salts on initial mud rigidity.

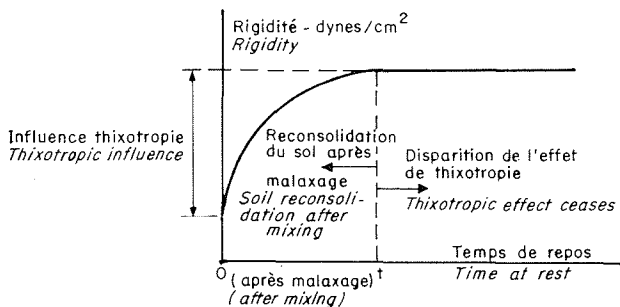


24/ Influence de différents pourcentages de sable dans la vase sur la rigidité initiale.
Effect of sand content on initial mud rigidity.

mesures de rigidité faites sur des vases ayant une concentration de 400 g/l et reposées depuis 1/2 h et sur les mêmes vases soumises à un malaxage ont montré que le taux de cisaillement pouvait être diminué de 10. Une vase vibrée ou une vase soumise à des fluctuations de pression sous l'effet de la houle pourra donc — dans certains cas — se fluidifier par suite de la thixotropie.

De même, on constate qu'après un malaxage énergique, la vase se fluidifie, puis reprend progressivement sa rigidité initiale lorsqu'elle est mise au repos. La rigidité croît en fonction du temps pour atteindre, dans la plupart des cas étudiés, une valeur asymptotique après 15 mn de repos. Les études en canal du comportement des vases sous les actions hydrodynamiques doivent tenir compte de cette propriété.

Cet aperçu des propriétés physiques des sédiments péltiques en eau calme montre la diversité des complexes sol-eau que l'on peut rencontrer en nature et des transformations successives qu'ils peuvent subir au cours des temps ou sous des actions physicochimiques, puisque telle vase dans un milieu aqueux déterminé peut se présenter avec une très grande cohésion ou, au contraire, être parfaitement fluide, si certains sels dissous viennent à être ajoutés au milieu aqueux. De même, le pourcentage des matières organiques contenu dans une vase aura une influence non négligeable sur ses propriétés dynamiques.



25/ Influence de la thixotropie sur la rigidité initiale de la vase.
Effect of thixotropy on initial mud rigidity.

L'étude de la dynamique des vases, en tant que mouvement des sédiments sous l'effet des forces de gravité, ou des actions de l'eau sous la forme des courants ou de la houle, devra prendre en considération la diversité des propriétés physiques de ces complexes sol-eau en les définissant non seulement par leur nature minéralogique et granulométrique — ainsi que par la constitution des eaux associées — mais également en fonction de leur concentration en sédiments secs (ou de la teneur en eau) ou, si l'on veut être plus précis, en fonction de la rigidité initiale et de la viscosité des complexes sol-eau.

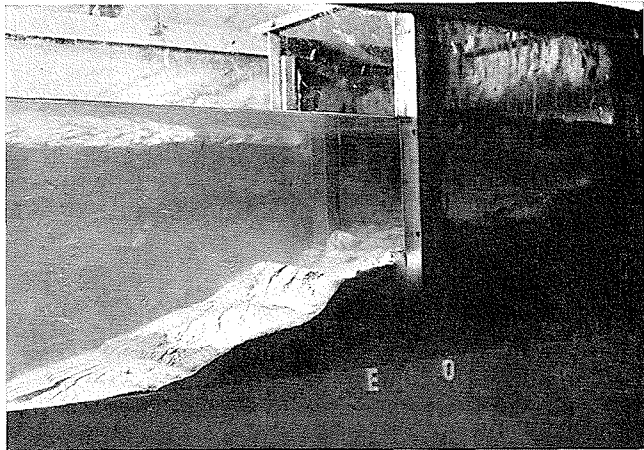
II. - Étude des pentes d'équilibre des vases sous l'eau et hors d'eau : éboulements, coulées et courants de turbidité

Sous l'influence de son poids, un dépôt sédimentaire sur un fond rigide en pente tend à se mettre en mouvement, si les efforts de gravité ne sont pas contre-balançés par la cohésion du matériau.

Un sol peu compact, n'ayant atteint qu'une faible concentration en particules solides, s'écoulera sur une pente très faible, alors qu'un sol très tassé, ayant atteint une cohésion interne élevée, pourra se maintenir en équilibre le long de pentes très raides.

Le profil d'équilibre du talus dépendra de la nature des sédiments et du milieu aqueux, du gradient de concentration à l'intérieur des dépôts, des surcharges éventuelles et, pour une part non négligeable, des actions hydrauliques ou océanographiques locales. Pour les fortes concentrations — donc pour les fortes rigidités initiales — une surcharge ou une perturbation sera nécessaire pour provoquer un glissement avec éboulement de blocs de vase qui s'individualisent, mais ne se diluent pratiquement pas. Pour les concentrations moyennes, les vases s'écouleront sur les fonds sous forme d'un fluide plastique homogène et la dilution à l'interface eau-vase sera faible, si les vitesses de glissement ne sont pas trop élevées.

Au contraire, si les sédiments péltiques sont très dilués dans le milieu aqueux (moins de 250 g/l), on passera progressivement des dépôts aux suspen-



26/

26/ Coulée d'une vase ayant une rigidité initiale de 20 dynes/cm².
Mud flow. Initial rigidity 20 dynes/sq.cm.

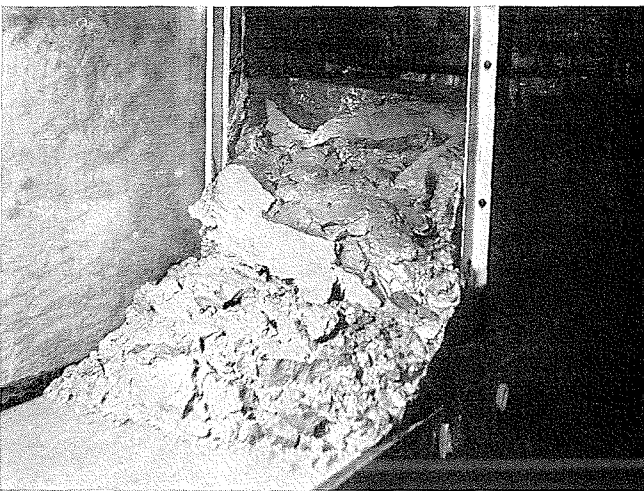
27/ Eboulement d'une vase ayant une rigidité initiale de 200 dynes/cm².
Collapsed mud bank. Initial rigidity 200 dynes/sq.cm.

28/ Courant de turbidité (rigidité initiale négligeable).
Density current. Negligible initial rigidity.

29/ Schéma montrant les conditions expérimentales de détermination de la pente d'équilibre sous l'eau.
Experimental conditions for the determination of angle of repose under water.

30/ Variation de la pente d'un talus de sable en fonction de la granulométrie.
Sand bank slope vs. particle size.

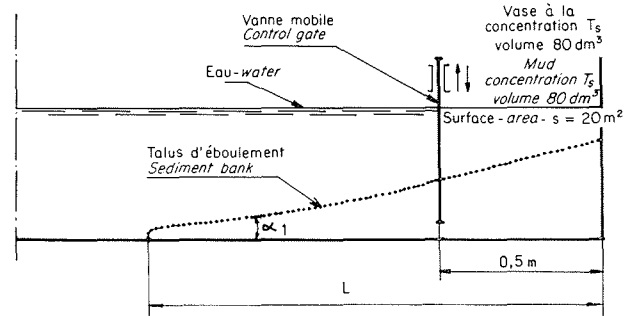
31/ Variation de la pente d'équilibre de différentes vases.
Angle of repose for various muds.



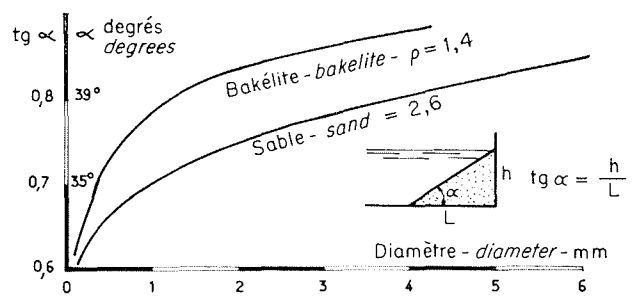
27/



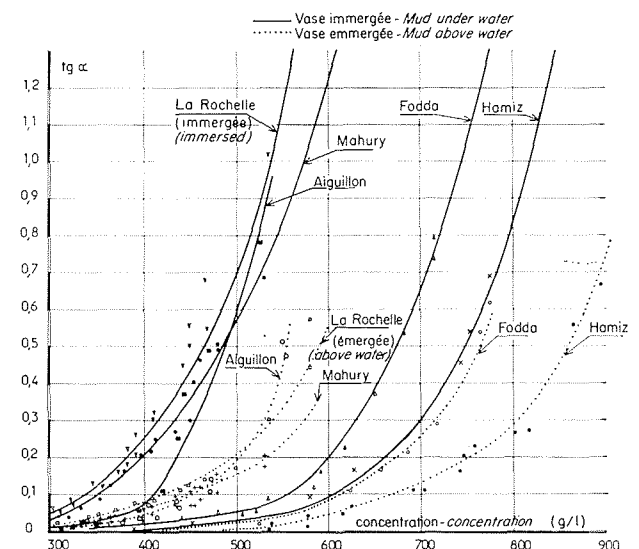
28/



29/



30/



31/

sions dont la rigidité initiale sera négligeable. Des courants de turbidité peuvent alors apparaître et se propager sur les fonds à de grandes distances de leur lieu de formation, transportant avec eux de grandes masses de matériaux.

Afin de donner un ordre de grandeur de ces différentes phases d'écoulement des vases sur les fonds, des mesures systématiques ont été réalisées dans un des canaux vitrés du Laboratoire, en recherchant en fonction des caractéristiques physiques des complexes sol-eau, les pentes moyennes d'équilibre de dépôts immergés ou émergés, le milieu aqueux étant supposé parfaitement calme. De même, des recherches ont été entreprises afin de définir les lois de formation, propagation et dépôt des courants de turbidité.

Dans tous les cas, les mesures ont été faites pour une hauteur constante des dépôts (0,40 m) et pour un même volume de mixture, la pente du profil d'équilibre étant évaluée en présentant une valeur moyenne de l'inclinaison du talus.

Ces recherches n'avaient pour but que de montrer l'influence de la nature des complexes sol-eau et de leur concentration sur la pente d'un dépôt et de rechercher le paramètre physique le plus représentatif de cette pente.

1. Pentes d'équilibre de talus de sédiments non cohésifs (sable et silt).

A titre de comparaison, une première série d'expériences a été réalisée sur des sédiments sableux non cohésifs, dont les diamètres moyens étaient compris entre 0,15 mm et 6 mm.

On constate que :

- la pente du talus de sable varie entre 31 et 40° environ ($\text{tg } \alpha$ comprise entre 0,6 et 0,85), la courbe de variation de la pente, en fonction du diamètre, a une allure parabolique, elle est indépendante du temps d'immersion du sable dans l'eau;
- la pente est peu modifiée, lorsque l'on vide lentement le niveau de l'eau;
- la pente est plus forte, lorsque la densité du matériau non cohésif diminue.

Précisons que ces valeurs ne sont valables qu'en eau parfaitement calme et correspondent à la pente maximale du talus. En mer et le long des côtes, les pentes moyennes des plages sont beaucoup plus faibles. P. Shepard donne des pentes des plages qui varient entre 2° ($\text{tg } \alpha = 0,035$) pour des sables fins de 0,12 mm et 15 à 20° ($\text{tg } \alpha = 0,36$) pour des galets de 60 mm de diamètre.

Le « Coastal Engineering » de 1966 donne comme pentes de plages :

DIAMÈTRE (en mm)	$\text{tg } \alpha$
0,2	1/50
0,4	1/15
0,6	1/10
0,8	1/5
1,0	1/4

2. Pentes d'équilibre de talus de sédiments péltiques cohésifs.

Contrairement aux sédiments non cohésifs, les sédiments péltiques présentent des pentes d'équilibre de leurs talus qui varient considérablement en fonction de l'état de tassement des dépôts, c'est-à-dire de la concentration en particules solides. La nature minéralogiques des sédiments, la composition du milieu aqueux, le pourcentage de sable contenu dans les sédiments, les conditions d'immersion ou d'émergence des dépôts interviendront dans la pente d'équilibre.

A - Influence de la nature et de la dimension des particules sédimentaires.

La composition minéralogique et granulométrique de la vase a une très grande influence sur la pente d'équilibre des dépôts. A concentrations identiques en particules solides, une vase prélevée à La Rochelle aura une pente d'équilibre légèrement plus forte qu'une vase prélevée à l'embouchure de Mahury, et très supérieure aux vases prélevées dans les oueds algériens, que ce soit l'oued Hamiz ou l'oued Fodda.

A titre d'exemple, une vase de La Rochelle immergée présentera en eau calme (eau douce) une pente d'équilibre de 6° ($\text{tg } \alpha = 0,1$) pour une concentration de 335 g/l, alors que la vase de l'oued Hamiz présentera la même pente d'équilibre pour une concentration de 600 g/l.

B - Influence de la concentration en particules solides et de la rigidité initiale sur la pente d'équilibre des vases immergées.

La pente d'équilibre des sédiments péltiques immergés ou émergés augmente très rapidement, en fonction de la concentration des dépôts. Comme pour la rigidité initiale, on constate que la pente d'équilibre, définie par sa tangente, augmente comme la quatrième ou la cinquième puissance de la concentration en particules solides.

En contrepartie, on peut dire que la pente d'équilibre d'un dépôt est directement proportionnelle à la rigidité initiale τ_y du dépôt mesuré à l'aide d'un viscosimètre à corps tournant; ces résultats étant valables pour les pentes inférieures à 60°.

$$\text{tg } \alpha = K\tau_y$$

Pour une vase immergée en eau douce, la valeur du coefficient $K \approx 0,025$, si l'on exprime la rigidité initiale en newton/m². Un dépôt d'éléments péltiques immergés dans de l'eau douce aura une pente d'équilibre d'environ :

$$\text{tg } \alpha = 1$$

c'est-à-dire une pente de 45°, si la rigidité initiale atteint 40 N/m².

$$\text{tg } \alpha \approx 0,025 \tau_y \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

Ces différents résultats montrent également qu'une vase déposée sous l'eau, sur une épaisseur de 1 m, depuis moins de un mois — c'est-à-dire présentant des rigidités initiales faibles — risque de s'écouler sur les fonds, et venir combler un chenal dragué. Par contre, une vase déposée depuis plusieurs mois présentera des rigidités initiales supé-

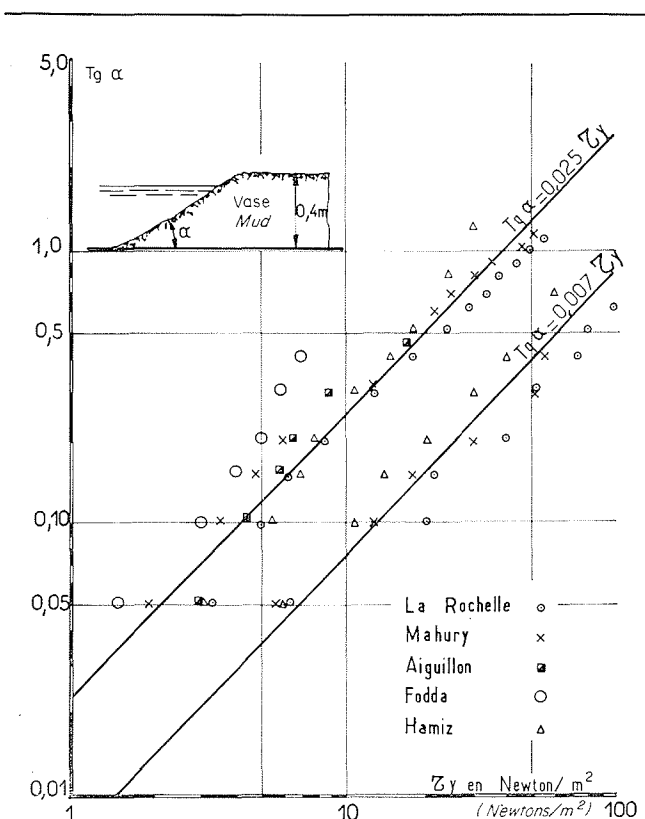
C. MIGNIOT

rieures à 5 N/m² et pourra être draguée avec une pente du talus de tg α = 0,10, si le milieu aqueux est parfaitement calme.

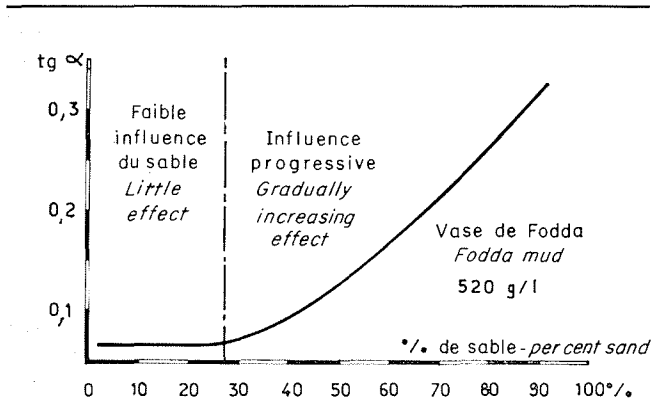
C - Comparaison entre les pentes d'équilibre des talus de vases immergées et émergées.

Le talus d'équilibre d'une vase émergée est — à concentration en particules identique — beaucoup plus faible que celui d'une vase immergée.

Pratiquement, les rapports entre les pentes d'équilibre des massifs sous l'eau et hors d'eau (caractérisées par la tangente de l'angle du talus avec l'horizontale) varient comme le rapport des densités apparentes (ρ_m - ρ)/ρ des vases immergées et émergées.



32/ Influence de la rigidité initiale sur la pente d'un talus de vase.
Effect of initial rigidity on mud bank slope.



33/ Influence de différents pourcentages de sable.
Effect of sand percentage.

Si l'on rattache la pente d'équilibre des vases émergées tg α' à la rigidité initiale τ_y des dépôts, on constate — comme pour les vases immergées — que la pente est directement proportionnelle à la rigidité initiale; par contre, la valeur de la constante K est plus faible :

$$\text{tg } \alpha' \approx 0,007 \tau_y \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

Ce résultat était valable — dans nos conditions d'expériences — pour les pentes inférieures à 45°.

D - Influence de différents pourcentages de sables, contenus dans des dépôts de vases, sur la pente d'équilibre des talus.

D'après les essais systématiques réalisés, l'introduction de 10 % de sable fin (sable provenant de la baie de Somme — diamètre moyen : 0,2 mm), dans des vases plus ou moins concentrées, ne modifie pratiquement pas la pente d'équilibre du talus, si l'on raisonne en fonction de la teneur en eau (ou de la concentration) de la vase seule.

A titre d'exemple, nous donnons, dans le tableau ci-dessous, les pentes sous l'eau mesurées sur des vases pures et sur les mêmes vases contenant 10 % de sable (vase provenant de l'oued Fodda).

CONCENTRATION VASE SEULE T _s (g/l)	PENTE VASE SEULE tg α	PENTE VASE + 10 % SABLE
630	0,27	0,25
600	0,115	0,12
540	0,037	0,04
490	0,027	0,03

Ces constatations sont valables aussi bien sur des vases immergées que sur des vases émergées. Par contre, si l'on raisonnait, non plus en fonction de la concentration de la vase seule, mais en fonction de la concentration globale (vase + sable), on obtiendrait, comme pour la rigidité initiale, des pentes d'équilibre plus faibles avec des vases sableuses qu'avec des vases pures.

Si l'on augmente le pourcentage de sable contenu dans une vase de concentration constante, on remarque que la pente d'équilibre du talus (immergé ou émergé) n'est pratiquement pas modifiée, tant que

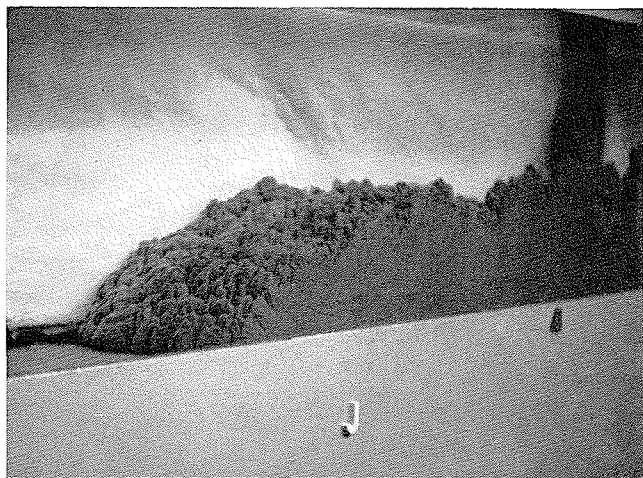
% SABLE INTRODUIT DES VASES	tg α
0	0,06
2	0,06
3,5	0,059
6	0,051
15	0,051
27	0,044
50	0,135
100	0,61



a/
Faible concentration (0,5 g/l)
Low concentration (0,5 g/l)



c/
Propagation dans une eau turbide
Propagation in turbid water



b/
Forte concentration (50 g/l)
High concentration (50 g/l)



d/
Action d'un courant de turbidité à très forte concentration sur des dépôts de vase peu consolidée (le dépôt est soulevé par le courant de turbidité)
Effect of a very highly concentrated density current on a relatively unconsolidated mud deposit, which it lifts up

34/ Propagation d'un courant de turbidité de vase / Propagation of a mud density current.

le pourcentage de sable ne dépasse pas 30 %. Au-delà, on constate un raidissement du talus (dans le cas des expériences et pour la concentration initiale de la vase adoptée).

E - Influence du milieu aqueux.

La pente d'équilibre d'un talus de vase est légèrement plus forte (à concentration en sédiments secs égale) en eau de mer qu'en eau douce fluviale. De même, certains sels défloculants, tel que le pyrophosphate de sodium, mis en grande quantité dans la vase, diminuent considérablement la pente d'équilibre.

Ces résultats recourent ceux obtenus pour la rigidité initiale des dépôts, qui apparaît comme la propriété physique la plus importante pour définir la pente d'équilibre sous l'eau, ou hors d'eau, susceptible d'être prise par différentes vases ou boues.

3. Courants de turbidité.

La différenciation essentielle entre les glissements, coulées et courants de turbidité, reste liée, d'après les expériences que le L.C.H.F. a pu réaliser, aux propriétés rhéologiques du milieu.

Les courants de turbidité prennent naissance à

partir de suspensions n'ayant pas de rigidité initiale propre, alors que les coulées boueuses se rattachent à des sols déjà compacts, plastiques ou solides.

Les premiers peuvent parcourir de très grandes distances sur des fonds presque horizontaux, et n'érodent des fonds que si ces derniers sont très peu consolidés; ils transportent de grandes quantités de matériaux et sont des agents de sédimentation. Les seconds prennent naissance à partir d'une rupture de l'angle d'équilibre des sols, c'est-à-dire d'un glissement, et peuvent se transformer en avalanches sous-marines, à pouvoir érosif élevé, si la pente des fonds est importante.

Les courants de turbidité sont dus à la différence de densité entre les fluides en présence, c'est-à-dire entre les suspensions comportant des quantités plus ou moins importantes de sédiments. Cette différence de densité entraîne, au voisinage du fond, une différence de pression directement proportionnelle, si l'un des fluides est constitué par de l'eau pure, à la turbidité T_s de la suspension.

Si la hauteur d'eau turbide au contact des eaux claires est H, la vitesse de formation du courant de turbidité sera donnée par l'expression :

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

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

- g' accélération réduite de la pesanteur;
- ρ_m masse spécifique de la suspension;
- ρ_0 masse spécifique de l'eau.

Pour une suspension de vase à 50 g/l, on voit que :

$$\frac{\rho_m - \rho_0}{\rho_m} = 0,029$$

La valeur de K, dans nos expériences en canal, était de 0,7 pour des suspensions à faibles viscosités et diminuait lentement lorsque la viscosité augmentait, pour s'annuler brusquement lorsque la rigidité initiale apparaissait, c'est-à-dire pour des concentrations, des suspensions égales ou supérieures à 250 ou 300 g/l, suivant la nature minéralogique des sédiments.

Pour une concentration de 50 g/l et une hauteur de suspension de $H = 1$ m, la vitesse maximale du courant de turbidité serait de 0,37 m/s; elle atteindrait 1 m/s pour une hauteur de suspension de 10 m.

Le passage des courants de turbidité aux coulées boueuses peut être défini par l'apparition d'une rigidité initiale dans la suspension, qui modifie brutalement les conditions de formation et de propagation des suspensions sur les fonds.

Sur fond horizontal, la vitesse d'un courant de turbidité non entretenu diminue d'autant plus rapidement que la concentration initiale de la suspension sera plus forte ou, plus exactement, que la viscosité de la suspension sera plus élevée. Il apparaît, d'après un certain nombre d'expériences, que la diminution de vitesse $\Delta V / \Delta L$, en fonction de la distance parcourue « L », varie proportionnellement à la viscosité de la suspension.

De même, il semble que les courants de turbidité déposent leurs matériaux dès que le nombre de Reynolds de l'écoulement turbide devient inférieur à :

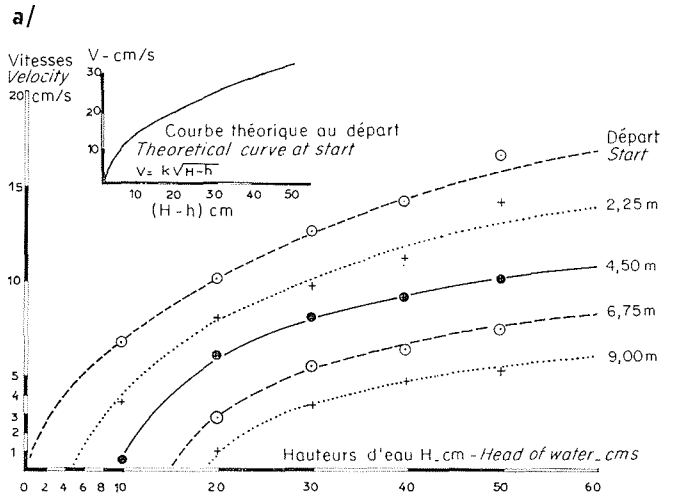
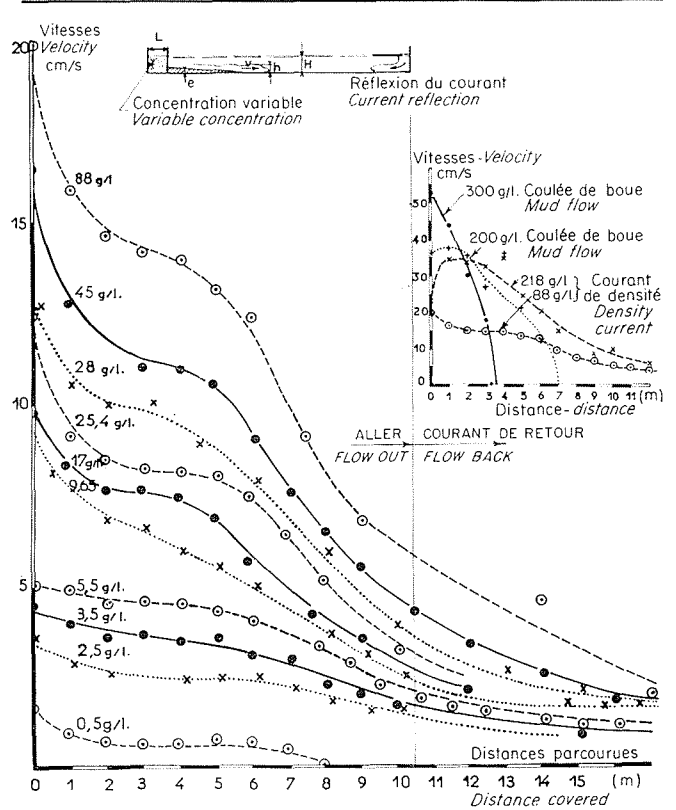
$$R = \frac{Vh}{\nu} \leq 2000 \quad \text{ou} \quad V \leq \frac{2000 \nu}{h}$$

- h étant la hauteur du courant de turbidité sur les fonds,
- V sa vitesse,
- ν la viscosité cinématique de la suspension.

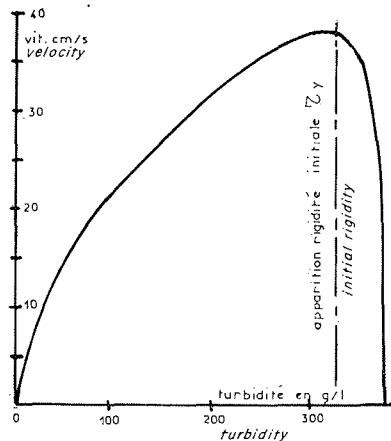
Un courant de turbidité formé avec des vases du Mahury ayant une concentration de 100 g/l déposerait ses matériaux dès que sa vitesse de propagation est inférieure à 1,0 m/s (en supposant l'épaisseur du courant de turbidité de 1 m).

Enfin, la dilution des courants de turbidité à l'interface suspension - eau dépendra de la vitesse relative V_r des écoulements. Si la vitesse de courant de turbidité augmente, ou si un courant d'eau pur lui est opposé, une dilution apparaîtra, tendant à réduire la force motrice d'entretien du courant de turbidité. La vitesse d'un courant de turbidité ne devrait donc pas pouvoir dépasser un certain seuil critique.

L'importance des courants de turbidité dans les phénomènes de transport et de dépôt sédimentaires ne doit pas être négligé et certains envasements ne peuvent être expliqués que par de tels processus.



35/ Conditions de propagation d'un courant de turbidité. Influence de la concentration en particules solides et de la hauteur d'eau. Density current propagation conditions. Effect of solid particle concentration and depth of water.



36/ Influence de la concentration sur la vitesse du courant de turbidité. Effect of concentration on density current speed.

III. - Comportement des dépôts de sédiments pélitiques sous différentes actions hydrodynamiques

De nombreux travaux traitent des conditions d'entraînement des matériaux meubles, non cohésifs, sous l'action des courants ou de la houle. Par contre, les conditions d'érosion et de transport des sédiments pélitiques sous les différentes actions hydrodynamiques sont moins connues; les premières études établies par le L.C.H.F. remontent à une douzaine d'années.

Depuis cette époque, le L.C.H.F. poursuit les recherches dans ce domaine, en prenant en considération la nature des sédiments pélitiques, les caractéristiques du milieu aqueux, l'influence de différents pourcentages de sable et surtout l'état de tassement des dépôts caractérisé comme pour les pentes d'équilibre des talus de vase, par la concentration en particules solides et leur rigidité initiale.

1. Etude de l'érosion des sédiments pélitiques par des courants en régime uniforme.

A - Généralités.

Rappelons que l'on peut définir le début d'entraînement, ou d'érosion d'un sol, soit :

— Par la vitesse moyenne de l'eau \bar{U} :

$$\bar{U} = \frac{Q}{S}$$

avec :

Q débit liquide;

et : S section transversale de l'écoulement.

Ce paramètre ne permet pas d'avoir une très grande précision, puisque la vitesse critique d'entraînement \bar{U}_c dépendra de la hauteur de l'eau H au-dessus du matériau. $\bar{U}_c = f/H^{1/6}$. Par exemple, si $\bar{U}_c = 25$ cm/s, pour une hauteur d'eau H de 0,10 m, U_c sera égale à 36 cm/s pour une hauteur d'eau de 1 m et à 55 cm/s pour une hauteur d'eau de 10 m;

— Par la force tractrice τ_0 , s'exerçant sur les fonds :

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R_H \cdot i \tag{1}$$

avec :

ρ masse spécifique de l'eau (en kg/m³);

g accélération due à la pesanteur (en m/s);

R_H rayon hydraulique (section mouillée : périmètre mouillé, en m);

i pente de la ligne d'eau;

— Par la vitesse de frottement U_* , telle que :

$$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho} \tag{2}$$

La vitesse de frottement U_* peut être reliée en régime uniforme à la vitesse moyenne \bar{U} par le coefficient C de Chézy :

$$\frac{\bar{U}}{U_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{KR_H^{1/6}}{\sqrt{g}} \tag{3}$$

Dans le cas de nos expériences (hauteur d'eau dans le canal vitré de 0,40 m), le coefficient

$C \approx 75$ et $\bar{U} = 24 U_*$; le coefficient K de Strickler est voisin de 100.

$$\bar{U} = KR_H^{2/3} i^{1/2}$$

Théoriquement, la mesure de U_* , c'est-à-dire la vitesse de frottement, devrait être simple, puisqu'il suffit de déterminer, en régime établi, la pente hydraulique « i » et le tirant d'eau « H », et d'en déduire à partir des équations 1 et 2, la valeur de U_* ou de connaître la vitesse moyenne \bar{U} et le coefficient de Chézy pour déterminer U_* , à partir de l'équation 3.

En pratique, la mesure de la pente « i » dans un canal expérimental de faible longueur s'avère très imprécise et l'on est obligé de déterminer U_* en fonction de la répartition des vitesses « U » aux différentes profondeurs « y » du fond et de la valeur du coefficient de rugosité k_s de Nikuradse.

(k_s : diamètre des sphères jointives qui donneraient, en régime turbulent rugueux, le même frottement sur le fond.)

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{y}{0,108 \frac{\nu}{U_*} + 0,033 k_s}$$

pour $y \leq 0,16 H$ (H : profondeur totale).

En prenant pour viscosité (ν) une valeur de : $1,15 \cdot 10^{-2}$ cm²/s (température : 13 °C), et en admettant que, sur des fonds de vase lissée, le coefficient k_s est négligeable, on obtient dans le système c.g.s. l'équation simplifiée :

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log 800 y U_* \tag{4}$$

A titre d'exemple, si $U_* = 1$ cm/s, on devrait avoir : $U = 16,6$ cm/s à 1 cm du fond et 22,5 cm/s à 10 cm du fond.

Pour des sédiments non cohésifs du type graviers, galets ou sables, les études faites par différents chercheurs montrent, qu'en moyenne, la force tractrice τ_c nécessaire pour éroder les fonds, est proportionnelle au diamètre des particules :

$$\tau_c \text{ (en N/m}^2\text{)} = KD \text{ (en mm)}$$

Suivant les auteurs, le coefficient K peut varier entre 1 (Shields) et 0,3 (Liu-Chang).

Pour des sédiments cohésifs du type « vases, limons ou boues », le diamètre des particules ne sera pas suffisant pour déterminer les vitesses de reprise et il faudra tenir compte — comme il l'a déjà été dit — de l'état de tassement des complexes sol-eau.

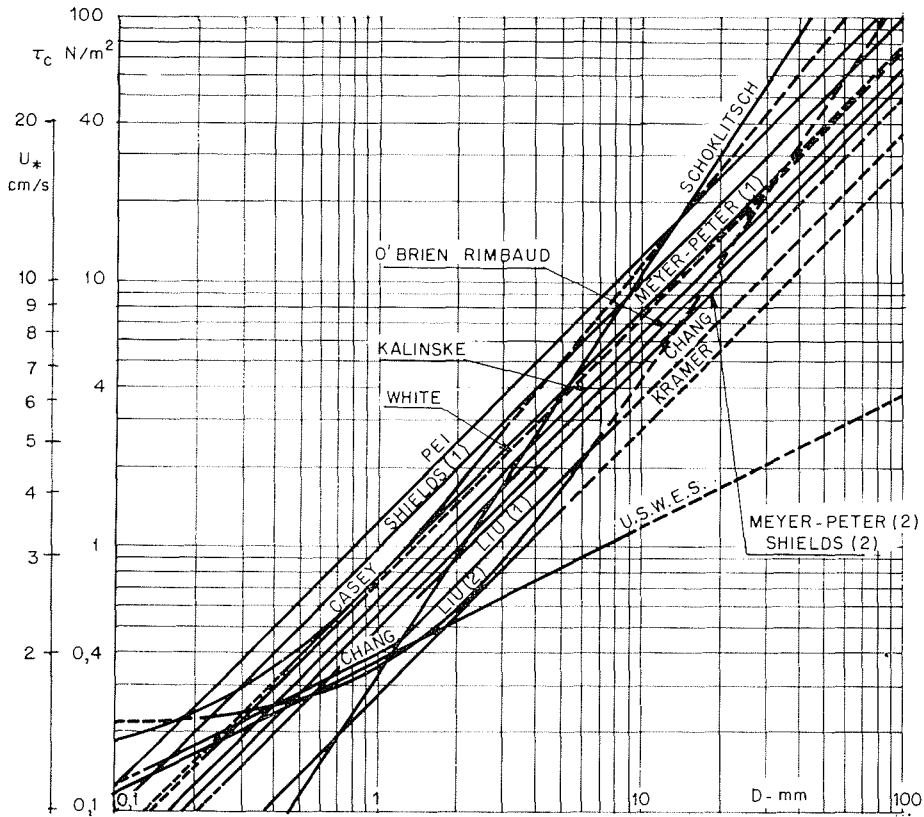
B - Conditions expérimentales.

Les mesures ont été réalisées dans le canal inclinable du L.C.H.F.

- longueur 12 m
- largeur 0,40 m
- hauteur 0,60 m
- inclinaison possible 1/12
- débit maximal 250 l/s
- réglage par vanne à l'aval, tranquillisateur à l'amont.

La vase est disposée au centre du canal sur une longueur de 3 m et une épaisseur de 12 cm; elle est homogénéisée et nivellée soigneusement.

Les vitesses sont mesurées à l'aide de micromoulinets « Hydrotechnica » de 1,5 cm de diamètre,



37/

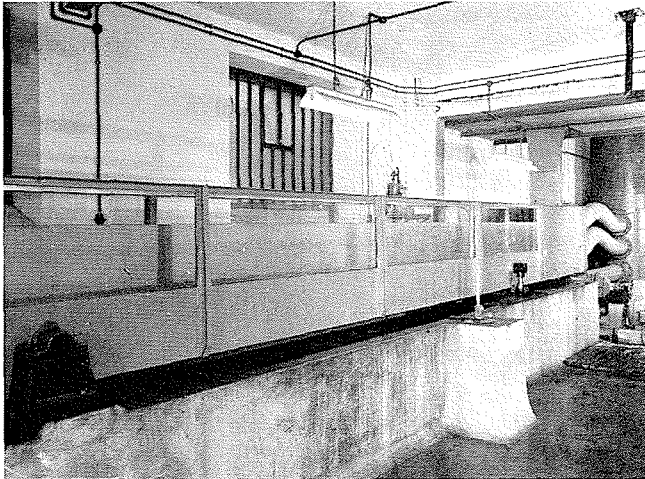
37/ Vitesse d'érosion des sédiments non cohésifs.
Non-cohesive sediment scour rate.

38/ Canal inclinable / *Tilting flume.*

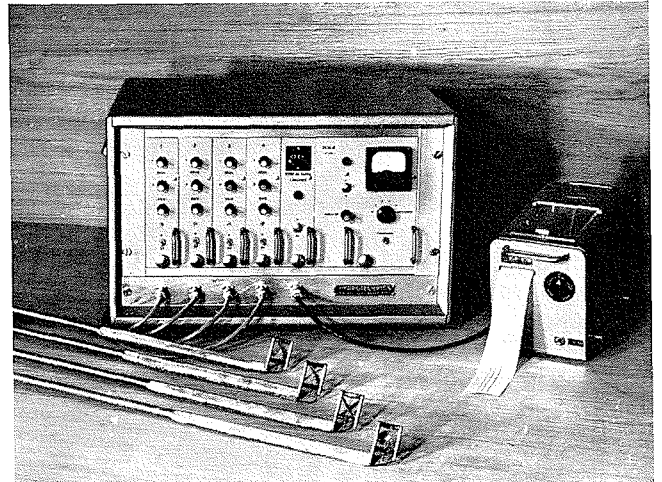
39/ Micromoulinets « Hydrotechnica ». *"Hydrotechnica" miniature current meters.*

40/ Action d'un courant sur des vases peu concentrées. Mouvements ondulatoires à l'interface.
Effect of flow on a low mud concentration. Waviness at the interface.

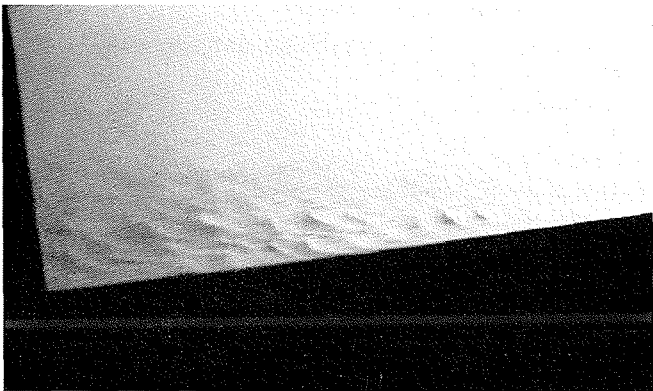
41/ Erosion des vases plastiques. Figures d'étirement.
Plastic mud erosion. Stretch figures.



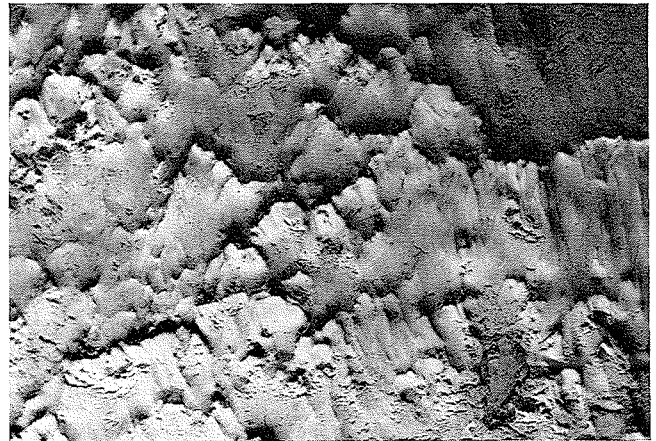
38/



39/



40/



41/

l'enregistrement étant effectué automatiquement sur toute la hauteur (de 5 mm en 5 mm jusqu'à 15 cm du fond et 1 cm en 1 cm au-delà, jusqu'à la surface).

La pente et le tirant d'eau sont relevés à l'aide de limnimètres au-dessus du réceptacle de vase et aux extrémités du canal.

Enfin, la turbidité des eaux est déterminée aux différentes profondeurs en amont et en aval du canal (mesure par colorimétrie).

Les vases sont préparées dans un bac malaxeur d'un type spécial et malaxées avec leur eau d'imbibition pendant une durée de 3 h au moins, avant d'être mises en place dans le canal. Après chaque mise en place de la vase et remplissage du canal (lentement), une durée de 15 mn est observée afin de permettre aux dépôts de reprendre une rigidité indépendante du malaxage.

C - Description des phénomènes d'érosion des vases par les courants à leurs différents stades de consolidation.

Suivant la concentration des dépôts de vase, c'est-à-dire leur état de tassement, l'érosion des fonds pourra s'effectuer très différemment :

— Pour les très faibles concentrations, cas qui peut se rapporter aux vases déposées au cours d'une étale de marée et n'ayant, par conséquent, pas eu le temps de se consolider, la suspension se comporte comme un véritable fluide visqueux (crème de vase), et il existe à l'interface de l'eau et de la vase une surface de discontinuité, où prend naissance un mouvement ondulatoire dû à la différence des vitesses entre fluides.

Si la vitesse du courant est suffisante et très supérieure à la vitesse de phase des ondes, on assiste à une transformation successive de la surface de discontinuité conduisant à une dislocation en tourbillons séparés et à un mélange de la vase fluide et de l'eau.

On constate, également, dans la masse de vase un déplacement général dans le sens du courant et une modification de la pente des fonds qui s'abaisse à l'amont et s'exhausse en aval, si un obstacle interrompt l'écoulement.

— Pour les concentrations moyennes, il devient difficile de déceler des ondes de discontinuité à l'interface de la vase et de l'eau.

La surface de la vase se plisse, présentant des figures de « déchirement » de la pellicule superficielle qui peut être arrachée du fond et totalement diluée dans les eaux. Le mouvement se propage de l'amont vers l'aval et les sédiments péloïtiques érodés sont transportés en suspension dans les eaux avec un gradient de concentration du fond (très chargé) vers la surface.

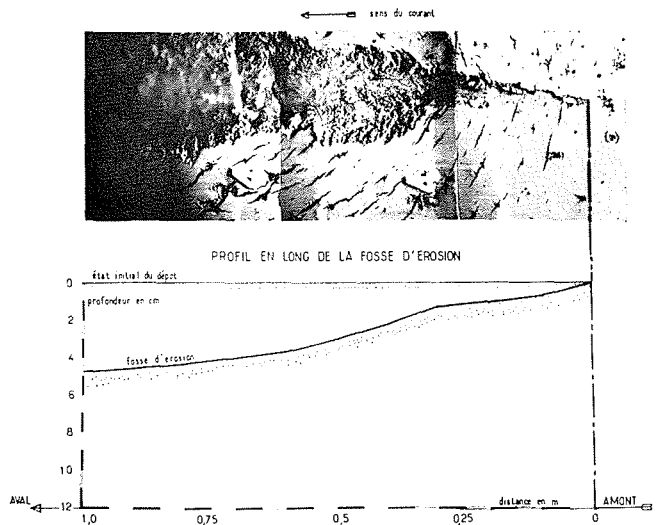
Après un certain temps d'action du courant, toute la surface de la vase est plissée et couverte de petits ridins.

Si l'on arrête l'action du courant, les marques de surface restent visibles, mais l'on constate que la vase qui avait été soumise à une extension vers l'aval, sous l'action des forces tangentielles sur les fonds, se rétracte vers l'amont exactement comme le ferait un corps plastique.

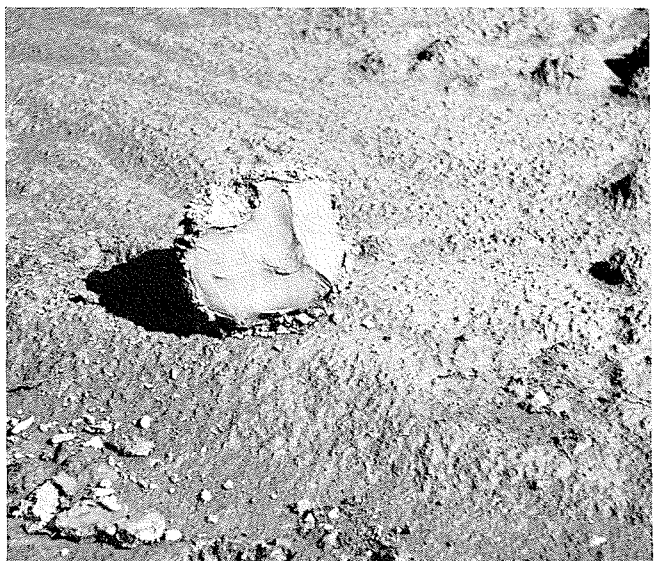
— Pour les fortes concentrations, c'est-à-dire pour des vases lassées depuis plusieurs mois ou, tout au moins, plusieurs semaines, il faut atteindre de très grandes vitesses pour obtenir des arra-



42/ Erosion des vases très concentrées. Figures d'arrachement et sillons.
Highly concentrated mud erosion. Mud being ripped from bed, gully erosion.



43/ Profils d'érosion des vases / Mud erosion profiles.



44/ Galets de vase / Mud pebbles.

C. MIGNIOT

chements de « copeaux » de vase consolidée. Ces morceaux de vase se diluent très difficilement dans les eaux et sont transportés sous forme de galets de faible densité, mais de forte cohésion.

Dans la plupart des cas, l'érosion prend naissance à partir d'un point préférentiel (particules de sable, puits de drainage, ...) et s'étend de l'amont vers l'aval, en formant un évasement progressif sur le plan horizontal et une fosse de plus en plus grande verticalement.

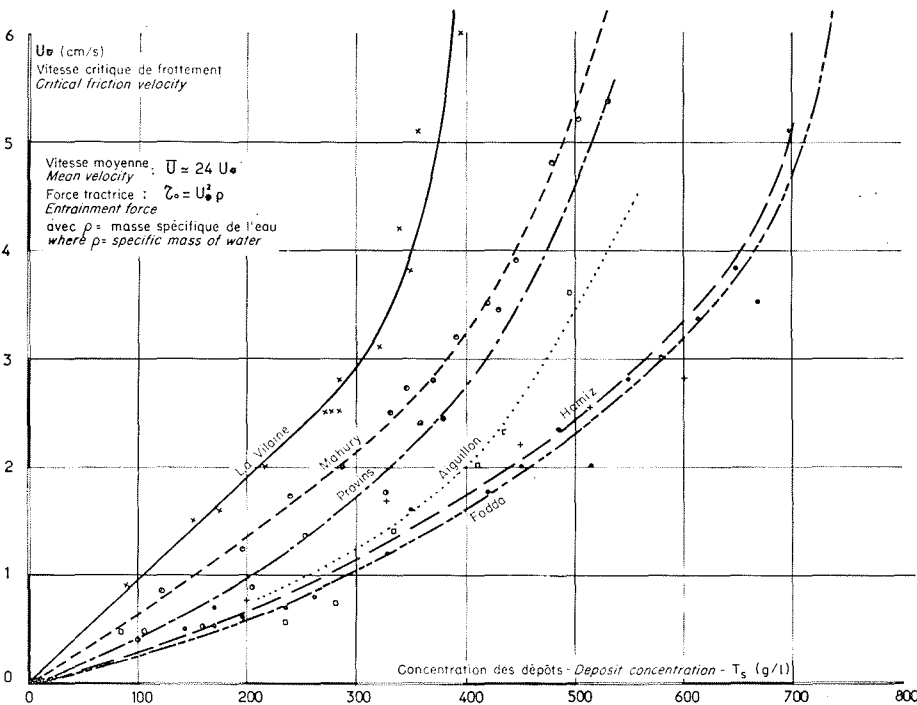
D - Influence de la nature minéralogique et granulométrique des sédiments péltiques.

Précisons, tout d'abord, que le seuil critique de remise en suspension — ou d'érosion — d'une vase

est assez marqué. En deçà de la vitesse critique de reprise, il n'y a pas mouvement; au-delà, on peut obtenir une remise en suspension d'une grande masse de vase.

De même, contrairement à ce qui peut se passer pour des sédiments grossiers du type galets, graviers et sables, une fois remise en suspension par le courant et diluée dans l'eau, il suffit de vitesses très faibles pour maintenir la vase en suspension. Ce fait reste vrai, tant que la rigidité initiale de la vase est faible; par contre, pour les fortes rigidités (galets de vase), les dépôts peuvent s'effectuer dès que la vitesse du courant diminue.

Lorsque l'on compare les vitesses critiques de frottement U_{*c} , nécessaires pour remettre en sus-

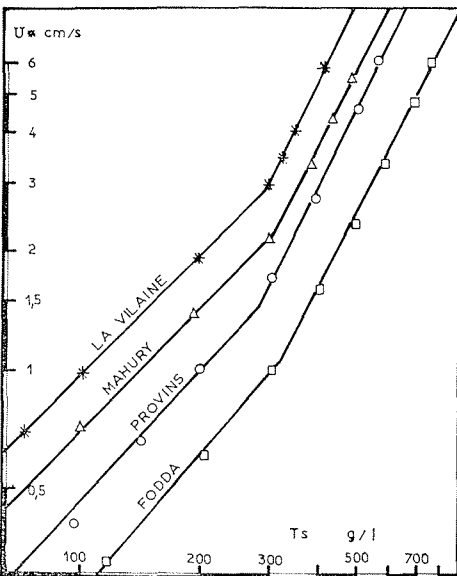


45/ Vitesses critiques d'érosion de différentes vases. Critical scour velocity for various muds.

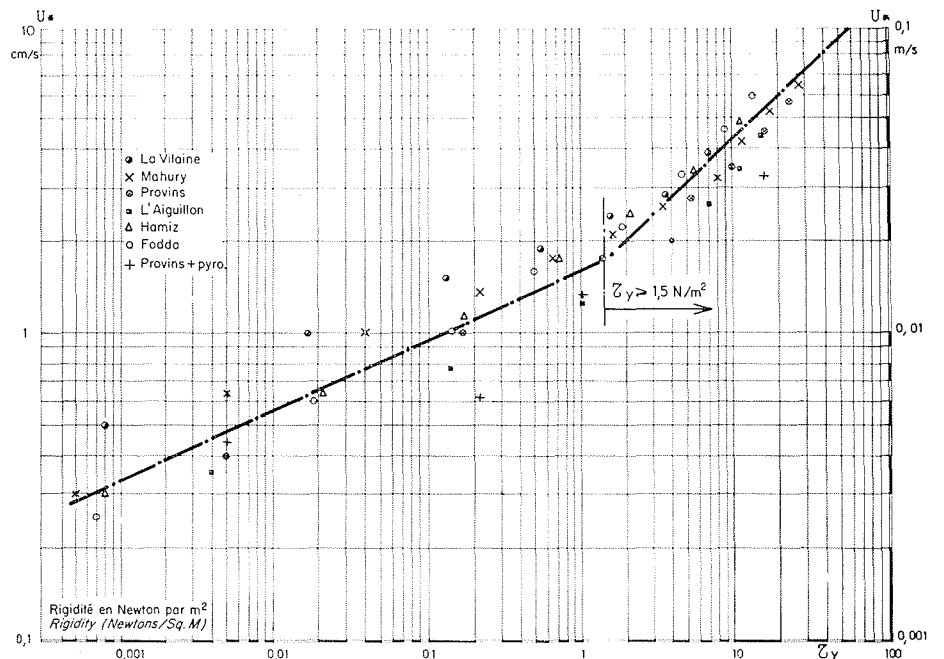
46/ Variation de la vitesse d'érosion en fonction de la concentration. Scour velocity vs. concentration.

47/ Variation de la vitesse d'érosion en fonction de la rigidité initiale. Scour velocity vs. initial rigidity.

45/



46/



47/

pension différentes vases (La Vilaine, Mahury, Provins, Aiguillon, Hamiz, Fodda, ...), on constate une très grande influence de la nature minéralogique des vases.

En eau douce fluviale, il faudra une vitesse de frottement U_* de 2 cm/s (environ 0,50 m/s en vitesse moyenne) pour éroder une vase de La Vilaine, ayant une concentration T_s de 200 g/l, alors que la même vitesse remettra en suspension des vases du Hamiz ou de Fodda, ayant des concentrations de 450 g/l.

Il n'est pas possible, dans l'état actuel, de définir avec précision l'influence exacte de la nature minéralogique des dépôts. Des expériences systématiques sur des sédiments péltiques de composition minéralogique simple : poudres de quartz, poudres calcaires, kaolinite, montmorillonite... et mélanges de ces constituants en pourcentages variables permettront peut-être de répondre prochainement à ce problème.

E - Influence de la concentration en particules et de la rigidité initiale des dépôts.

L'interprétation des mesures de vitesses critiques d'entraînement des vases, en fonction de la concentration en particules solides dans les dépôts, tend à montrer que, en première approximation :

— Pour des dépôts anciens, la vitesse critique d'érosion U_* varie comme le carré de la concentration T_s :

$$U_* \approx K T_s^2$$

K dépend de la nature des complexes sol-eau et peut varier dans des proportions importantes d'un sédiment à l'autre (dans un rapport de 1 à 5, voire de 1 à 10).

— Pour des dépôts récents et imparfaitement consolidés, la vitesse d'érosion varie proportionnellement à la concentration en sédiments :

$$U_* \approx K' T_s$$

En portant les vitesses critiques d'érosion U_* , en fonction de la rigidité initiale τ_y (mesurée comme il l'a été dit précédemment, à l'aide d'un viscosimètre à corps tournant), on constate que l'ensemble des points de mesures se groupe, quels que soient les complexes sol-eau étudiés, autour de deux droites correspondant aux valeurs des rigidités situées de part et d'autre de 1 à 2 N/m² environ.

Pour les valeurs de la rigidité initiale supérieure à 2 N/m², c'est-à-dire pour des dépôts consolidés, la vitesse critique d'érosion est donnée par l'expression approchée :

$$U_* \approx 0,016 \tau_y^{1/2}$$

si : U_* est exprimé en m/s;

et : τ_y en N/m².

et à :

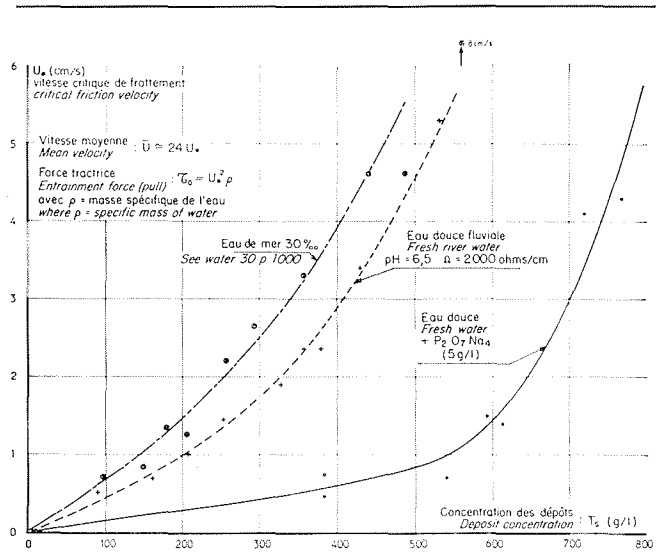
$$U_* \approx 0,50 \tau_y^{1/2}$$

si U_* est exprimé en cm/s et τ_y en dynes/cm².

Pour les dépôts ayant une rigidité initiale inférieure à 1 N/m², c'est-à-dire pour des dépôts plastiques non consolidés, la vitesse critique d'érosion U_* sera rattachée à la rigidité initiale τ_y par :

$$U_* = \tau_y^{1/4}$$

si U_* est exprimé en cm/s et τ_y en dynes/cm².



48/ Influence du milieu aqueux sur l'érosion des vases. Effect of water environment on mud erosion.

F - Influence du milieu aqueux sur la vitesse d'érosion des vases.

Le milieu aqueux a une très grande influence sur les conditions d'érosion des vases.

A concentration en particules solides identique, et pour un même sédiment, il faut :

- une vitesse du courant environ 1,7 fois plus grande pour éroder une vase déposée en eau de mer qu'une vase déposée en eau douce;
- une vitesse du courant environ sept à huit fois plus faible pour éroder une argile de Provins dans une eau douce contenant des sels défloculants que la même argile en eau de mer.

On retrouve, ici encore, très exactement, les mêmes résultats que l'on avait obtenus au cours des mesures de la rigidité initiale et de la viscosité de suspension d'un même sédiment dans différents milieux aqueux.

G - Influence des différents pourcentages de sables contenus dans une vase.

Différents pourcentages de sable fin ont été introduits dans une vase de Fodda de concentration constante (470 g/l) et des mesures systématiques de vitesse critique de reprise par les courants réalisées.

CONCENTRATION VASE T_s (g/l)	POURCENTAGE SABLE (%)	CONCENTRATION GLOBALE VASE + SABLE	VITESSE DE REPRISE	
			\bar{U} (cm/s)	U_* (cm/s)
465	13,6	525	55	2,3
475	22,5	582	60	2,5
470	39,5	697	57	2,4
471	52,5	830	49	2,05
470	66	1 000	45	1,9
sable pur	100	2 000	32	1,35

Il semble, d'après ces résultats, que, seule, la teneur en eau de la vase qui englobe les particules de sable ait une grande importance; ce résultat reste valable jusqu'à une teneur des dépôts en sable de 30 %. Au-delà, la vitesse critique U_* a tendance à diminuer.

Ces résultats sont conformes à ceux qui avaient été obtenus en examinant l'influence, sur la rigidité initiale, de différents pourcentages de sables introduits dans une suspension d'éléments pélitiques.

H - *Passage de sables, graviers et galets sur des vases plus ou moins consolidées.*

Les études précédentes ont montré que la vitesse critique d'érosion d'une vase, déposée depuis un temps assez long, pouvait être très supérieure à celle nécessaire pour entraîner des sédiments grossiers.

C'est ainsi qu'une vase ayant atteint une rigidité initiale τ_y de 10 N/m² ne sera pas érodée pour des vitesses U_* du courant, inférieures à 5 cm/s, alors que des sables grossiers ou des petits graviers pourront se déplacer à cette vitesse du courant.

Des mesures systématiques, faites au Laboratoire, ont permis de définir les conditions de transit des sables, graviers et galets, sur des fonds de vases plus ou moins consolidées, afin d'apporter certains éclaircissements à des problèmes d'ordre sédimentologique.

Au cours de ces expériences, on a constaté que :

- pour de faibles concentrations des dépôts de vase, c'est-à-dire sur des vases déposées depuis peu de temps, il pouvait y avoir piégeage des particules de sable en transit, dans la masse de vase. Ce phénomène se produit pour des rigidités initiales des dépôts, inférieures à 1 dyne/cm²;
- pour des concentrations de vase plus fortes, les sables pouvaient transiter sur les vases sans être piégés, de même que les graviers et petits galets, dès que la rigidité initiale dépassait 1 N/m². Ces déplacements peuvent s'effectuer, soit par glissement, soit par saltation, des points d'impact marquant alors la surface de la vase.

Une vase consolidée n'est donc pas un obstacle au passage des sables et graviers, et l'on peut très

bien avoir dans une rivière ou un estuaire un transit des sédiments grossiers vers l'aval, au-dessus de bancs de vase.

2. *Etude du déplacement des sédiments pélitiques par les courants de marée.*

En vue d'études ultérieures sur la similitude des limons et autres sédiments très fins, des recherches ont été entreprises, il y a quelques années, au L.C.H.F., afin d'examiner les conditions de mise en dépôt et de remise en suspension de différents complexes sol-eau, dans un estuaire schématisé.

Cet estuaire avait la forme d'un convergent régulier de 40 m de longueur, 0,85 m de largeur à l'aval et 0,25 m de largeur à l'amont. La marée représentée était du type fluvial et présentait environ 1/3 de flot et 2/3 de jusant.

Les essais ont porté sur différents types de sédiments pélitiques dispersés dans des milieux aqueux, contenant en proportions variables, soit des sels flocculants (Cl₂Mg), soit des sels déflocculants (P₂O₇Na₄). Les apports étaient supposés d'origine marine et introduits à la limite aval du modèle.

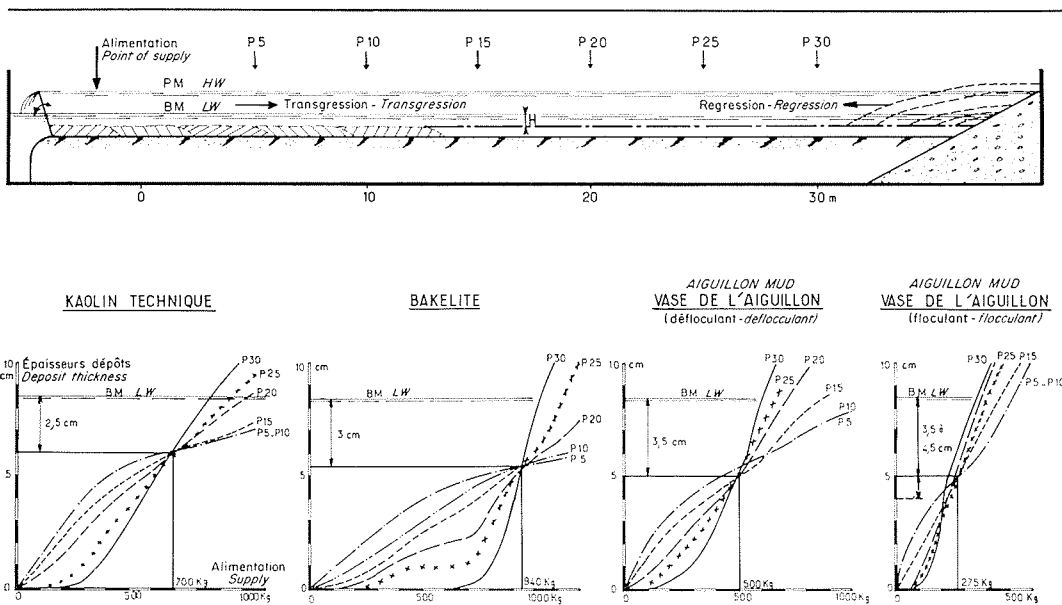
Suivant les cas, les essais étaient réalisés sans débit fluvial ou avec un débit fluvial faible. Des mesures systématiques permettaient de suivre les évolutions des fonds obtenus sur le modèle, au cours du temps, et d'examiner l'influence des différents paramètres hydrauliques sur les mouvements sédimentaires.

Parallèlement à ces recherches en modèle réduit, un certain nombre de mesures faites par nos missions d'études en nature, ont pu être comparées.

Les différents résultats obtenus, tant sur modèle qu'en nature, permettent de formuler un certain nombre d'hypothèses sur le déplacement des vases sous l'action des courants de marée.

A - *Etude sur modèle de la sédimentation d'un estuaire schématisé par des apports d'origine marine (sans débit fluvial).*

Sous l'action des courants de marée, agissant dans un estuaire supposé dragué uniformément à



49/
Comblement
d'un estuaire schématisé
par différentes vases.
*Silting up
of a theoretical estuary
with various forms of mud.*

une cote très profonde, par rapport à l'amplitude de la marée, et non soumis à des débits fluviaux, on constate que les sédiments péltiques alimentés à l'aval sont remontés vers l'amont.

Dans un premier stade, la sédimentation se localise uniquement dans la partie aval de l'estuaire, où les fonds s'exhaussent progressivement. Les vitesses étant localement augmentées dans cette zone, la sédimentation gagne progressivement les secteurs de plus en plus amont. A un certain stade d'évolution (temps t) — et pour un type de complexe sol-eau déterminé — les profondeurs de l'estuaire seront constantes sur toute son étendue; les fonds sont horizontaux et à une cote « H » sous le niveau moyen des eaux.

Au-delà de ce stade d'évolution, les sédiments se déposent à la partie amont de l'estuaire et l'on assiste à une sédimentation régressive de l'amont vers l'aval.

La sédimentation est donc maximale à l'aval de l'estuaire, tant que l'état d'équilibre n'est pas atteint, et devient plus importante à l'amont, lorsque cette phase sédimentaire est dépassée.

La profondeur H sous le niveau moyen des eaux, et le temps t à partir duquel les fonds sont horizontaux sur toute l'étendue de l'estuaire, dépendent — en dehors des caractéristiques hydrauliques — des propriétés physiques des sédiments péltiques et de leur milieu aqueux. D'une façon générale, la profondeur critique H sera d'autant plus importante que les complexes sol-eau présenteront à leurs différents stades de tassement des rigidités initiales τ_y plus faibles.

En agissant sur les caractéristiques du milieu aqueux, il sera possible, sur un modèle réduit, d'ajuster les valeurs de H et de t , et d'adopter ainsi le complexe sol-eau aux exigences de la similitude.

B - Mouvement des sédiments péltiques dans un estuaire schématique, sans alimentation en matériaux mobiles et sans débit fluvial.

Sous l'action des courants de marée, un estuaire schématique dont la profondeur moyenne est uniforme sur toute son étendue et inférieure à la profondeur critique H précédemment définie, sera soumis à des remaniements importants, si la rigidité initiale des dépôts est inférieure à la force tractrice sur le fond.

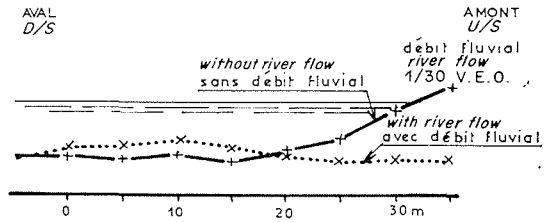
Les sédiments seront remontés vers l'amont par les courants et pourront, dans certains cas, émerger. Le profil final des fonds présentera une pente douce de l'amont vers l'aval, qui atteignait, dans le cas de nos expériences, 1,4 ‰, lorsque le nouvel état d'équilibre était atteint.

C - Influence d'un faible débit fluvial sans alimentation en matériaux mobiles.

L'introduction d'un faible débit fluvial à l'amont de l'estuaire (1/30^e du volume d'eau oscillant) modifie fortement le profil des fonds de l'estuaire. Cette influence est d'autant plus sensible que la rigidité initiale des dépôts est plus faible.

Sous l'action du faible débit fluvial, les fonds s'érodent à l'amont et tendent à s'exhausser légèrement vers l'aval, le reste étant entraîné vers le large (en dehors des limites du modèle).

Si l'on arrête le débit fluvial et si l'on réalimente le modèle à l'aval, la transgression sédimentaire



50/ Influence d'un débit fluvial sur les dépôts dans un estuaire schématique.
Effect of river flow on deposits in a theoretical estuary.

reprend et les fonds s'exhaussent à nouveau vers l'amont.

Il existerait donc une modification permanente des fonds d'un estuaire, en fonction du débit fluvial, si les dépôts ne sont pas très consolidés.

D - Déplacement des sédiments péltiques dans les estuaires en nature.

En nature, les phénomènes sont très complexes et ne reflètent que faiblement les schémas simplifiés d'un modèle schématique.

De l'ensemble des estuaires étudiés en nature, Betsiboka, Cayenne, Mahury, Sèvre niortaise, La Vilaine, auxquels on peut ajouter les actions alternatives des courants devant Conakry, on remarque que :

- en un point donné d'un estuaire, la turbidité maximale, au cours d'une marée, croît exponentiellement en fonction de l'amplitude de la marée « A » (carré ou cube de l'amplitude). Elle peut être très faible par petit coefficient et devient importante pour les coefficients supérieurs à 70;
- il ne semble pas qu'au cours d'une même marée, la turbidité puisse être reliée directement à la vitesse moyenne du courant au même point. On constate très fréquemment (La Vilaine, Bombetoke, Mahury), que la turbidité augmente brutalement au voisinage du fond, après l'étalement de basse-mer, et ceci, bien que les courants soient encore faibles en valeur absolue. On peut penser qu'il existe à ce moment un gradient de vitesse important près du fond, capable de créer une forte turbulence propice à la remise en suspension des vases fluides;
- les gradients de turbidité, entre le fond et la surface, semblent plus importants en flot (B.M. à P.M.) qu'en jusant, à l'amont de l'estuaire qu'à l'aval;
- les turbidités augmentent également, lorsque l'on remonte l'estuaire, puis rediminuent ensuite, lorsque l'on s'approche de la limite du bief fluvio-maritime;
- d'une façon générale, la résultante des mouvements sédimentaires s'effectue de l'aval vers l'amont, au cours des périodes d'étiage, des masses importantes de vase pouvant être remontées à plusieurs dizaines de kilomètres de l'embouchure (envasement du secteur de Redon dans La Vilaine, de l'amont du Degrad-des-Cannes au Mahury...). Au contraire, des masses importantes de vase peuvent transiter lentement de

C. MIGNIOT

l'amont vers l'aval en période de crue. Si les apports sédimentaires extérieurs sont faibles, l'estuaire — bien qu'en perpétuel mouvement — est dynamiquement stable;

- la présence d'un gradient de salinité ou d'un coin salé peut modifier très fortement les mouvements des sédiments péltiques dans un estuaire.

Ces différents schémas de la nature restent en accord avec les observations faites au cours des essais sur les modèles d'estuaires schématisés. La complexité des phénomènes en cause ne permet pas, toutefois, de proposer des lois précises, et des mesures multiples seront nécessaires pour y parvenir.

3. Action des houles et des clapots de vent sur des dépôts de vase plus ou moins consolidée.

Les houles et les clapots de vent ont une influence considérable sur les fonds de vase plus ou moins consolidée.

Suivant les caractéristiques du matériau et de la houle, des masses importantes de vase pourront soit être remontées des fonds et déplacées le long du littoral sous forme de barres ou de bancs mouvants, ayant une individualité propre et présentant une interface vase-eau assez nette, soit au contraire, être remises en suspension dans les eaux, formant en bordure du littoral un immense fleuve d'eaux boueuses susceptible de transporter des quantités importantes de vase en suspension dans les courants littoraux et de contribuer à la sédimentation des estuaires.

Ce double aspect de la contribution de la houle dans le transit des vases a été étudié pour la première fois au Laboratoire en 1956-57 et sa démonstration mathématique faite en 1958, par M. P. Lhermitte (*Contribution à l'étude de la couche limite des houles progressives*).

Si les houles et les clapots de vent agissent directement sur les mouvements de la vase, en contrepartie cette dernière modifie les lois de propagation des houles et peut, dans certains cas, provoquer un amortissement total des vagues qui sont complètement « absorbées » dans la vase molle avant d'atteindre la côte.

En nature, ces différents processus d'interactions de la houle et de la vase ont une grande importance le long des côtes.

A - Conditions expérimentales.

L'influence de la houle et des clapots de vent, sur des fonds de vase plus ou moins consolidée, a été étudiée dans le grand canal vitré du Laboratoire.

- largeur. 1 m
- longueur. 60 m
- profondeur. 1 m

En raison de l'étendue des problèmes posés, les investigations ont dû être limitées à un certain nombre de cas simples.

C'est ainsi que, notamment, l'influence de l'épaisseur des dépôts sédimentaires péltiques n'a pas fait l'objet de recherches systématiques, et, qu'en conséquence, nos résultats ne sont applicables qu'à

des dépôts superficiels ou d'épaisseur relativement faible, alors qu'en nature on pourra rencontrer des dépôts de vase pouvant atteindre des épaisseurs importantes et présenter, par conséquent, un gradient de consolidation entre leur surface et les fonds sur lesquels ils se sont sédimentés.

B - Propagation de la houle sur des fonds de vase.

La propagation de la houle sur des fonds de vase non consolidée ne présentera pas les mêmes lois que sur un fond parfaitement rigide. La profondeur d'eau à prendre en considération dans les formules classiques donnant la longueur d'onde, pour une période déterminée, sera plus importante que l'épaisseur de la lame d'eau claire située au-dessus de l'interface eau-vase. On peut estimer, d'après les résultats de nos expériences, qu'il faudra atteindre une rigidité initiale supérieure à 20 N/m² pour que les fonds se comportent comme un sol rigide; pour les valeurs plus faibles, on admettra que les longueurs d'onde peuvent être légèrement plus grandes que celles résultant d'un calcul direct basé sur la profondeur d'eau au-dessus des fonds de vase.

C - Influence de la houle sur les propriétés physiques des vases.

La vitesse de chute des flocons de sédiments péltiques pourra être fortement modifiée par l'action de la houle. Extrêmement fragiles, ces flocons de vase se « désagrègent » en éléments plus petits entraînant une diminution de la vitesse de chute moyenne des flocons qui pourra être cinq fois plus faible sous la houle que celle mesurée en eau calme.

De même, les mouvements orbitaires de la houle pourront se développer dans une vase peu tassée provoquant un brassage important des dépôts.

Ce brassage aura pour effet, d'une part, de diminuer considérablement les possibilités de tassement de la vase, d'autre part, de « fluidifier » des dépôts plus anciens par suite des propriétés thixotropiques de certaines vases.

Les mouvements orbitaires dans la masse de vase seront d'autant plus importants que la houle sera plus forte, les profondeurs plus faibles et la rigidité des dépôts plus petite.

On constate ici encore qu'il y a interaction entre les propriétés physiques des dépôts et les actions hydrodynamiques de la houle.

Cette action de la houle sur les possibilités de consolidation de dépôts de sédiments péltiques se retrouve en nature. On constate, par exemple, une diminution progressive de la teneur en eau des dépôts au fur et à mesure que les profondeurs d'eau augmentent. En Guyane française, nos missions d'études en nature, ont pu mesurer les variations suivantes :

DISTANCE	PROFONDEUR (m)	TENEUR EN EAU (%)
Cote	0	200
à 2 km	— 2	150 à 175
» 3 »	— 3	125 à 150
» 4,5 »	— 4	100 à 125
» 6 »	— 5	100

D - Remontée de la vase vers le rivage sous l'action des houles longues océaniques.

Se superposant au mouvement orbital dans la vase, un mouvement de translation moyen des particules pourra prendre naissance et transporter, sans remise en suspension, une quantité importante de matériaux dans la même direction que celle de la propagation de la houle suivant un processus comparable à celui relevé dans la couche limite.

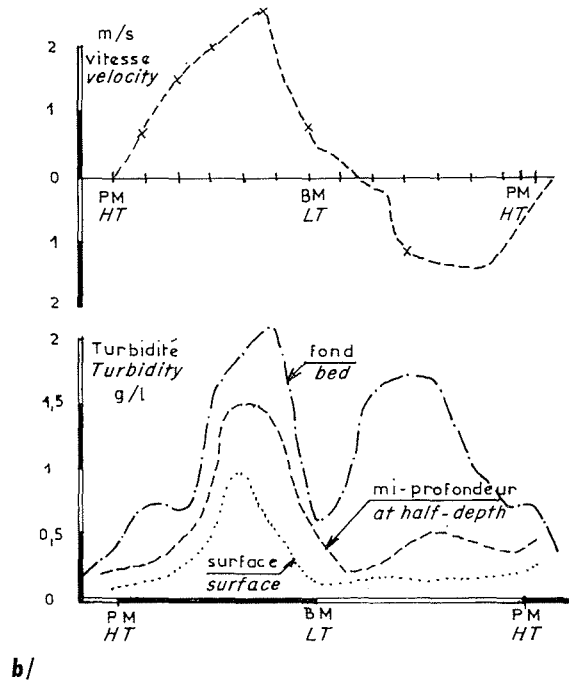
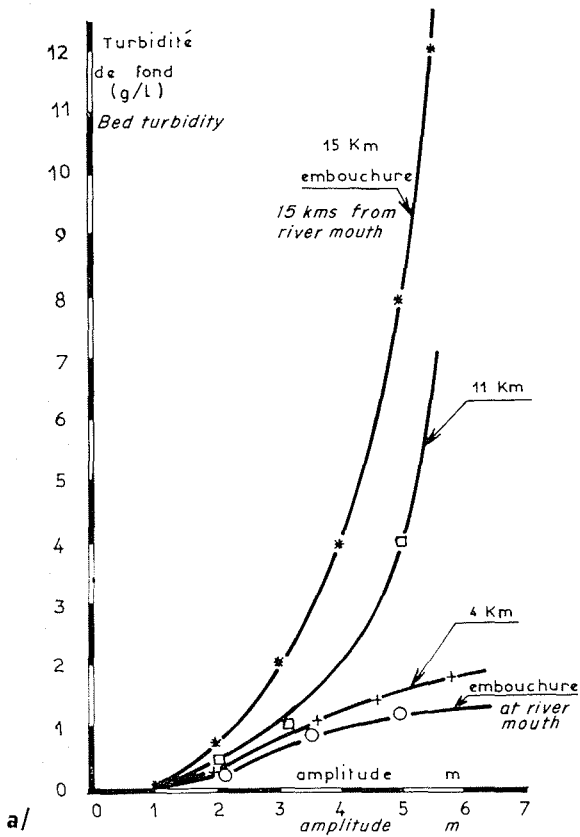
Dans nos conditions d'expérience, c'est-à-dire pour un certain type de houle et entre certaines limites de la viscosité des fonds, il existe une relation entre la vitesse U_T de translation des particules de vase et la vitesse U_{fv} maximale des mouvements

oscillatoires dans la vase. Cette relation est de la forme

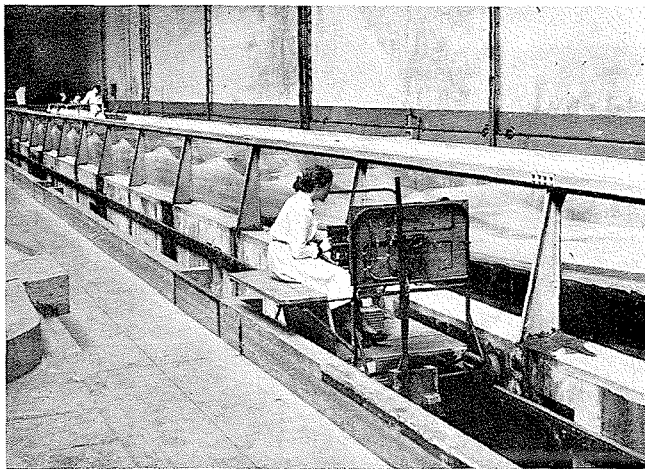
$$U_T = 0,02 U_{fv}^{1,6}$$

M. P. Lhermitte a montré qu'il suffisait que le gradient de pression soit de l'ordre de grandeur de la rigidité initiale des vases pour que ce processus puisse se produire et que l'on assiste à une lente remontée des vases vers le littoral.

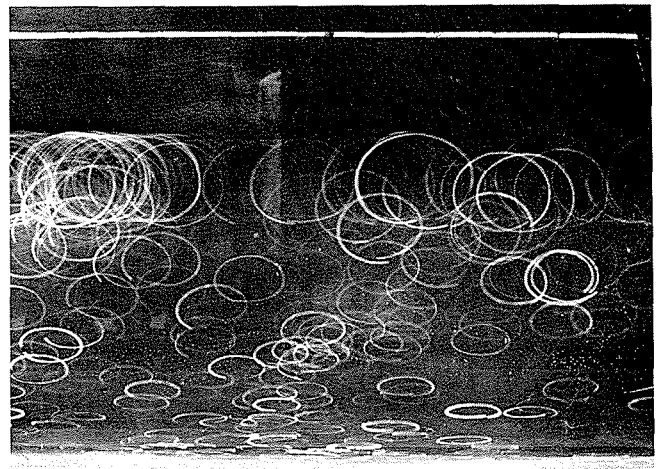
Toutefois, si l'on dépasse un certain seuil critique d'agitation, ou si l'on se rapproche des petits fonds, les mouvements dans la vase pourront s'amplifier et conduire à une remise en suspension des sédiments au-dessus des fonds.



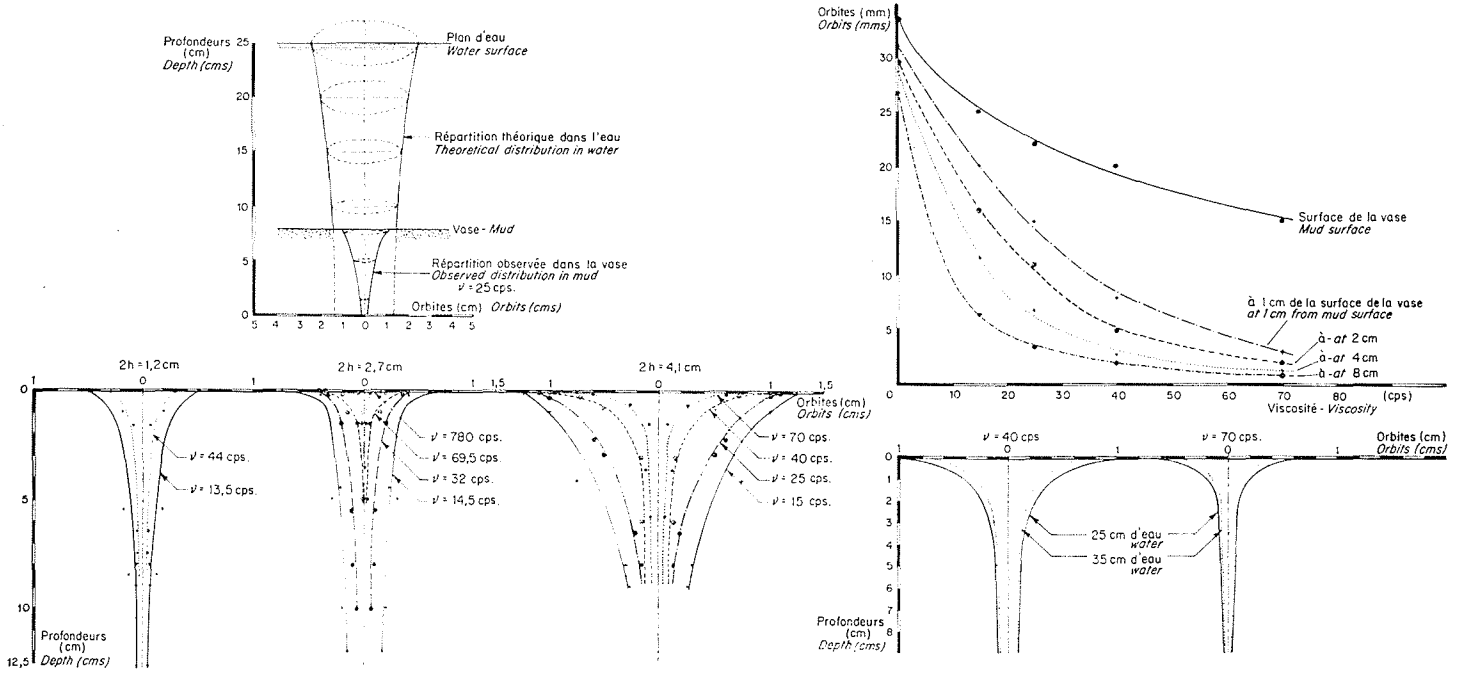
51/ Exemples de la variation de la turbidité dans un estuaire.
Examples of turbidity variation in an estuary.



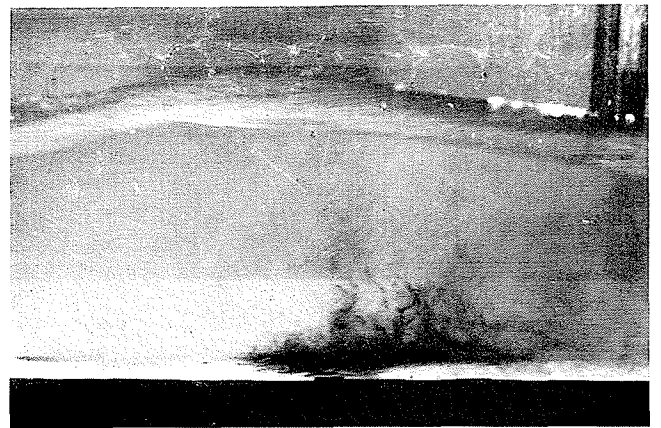
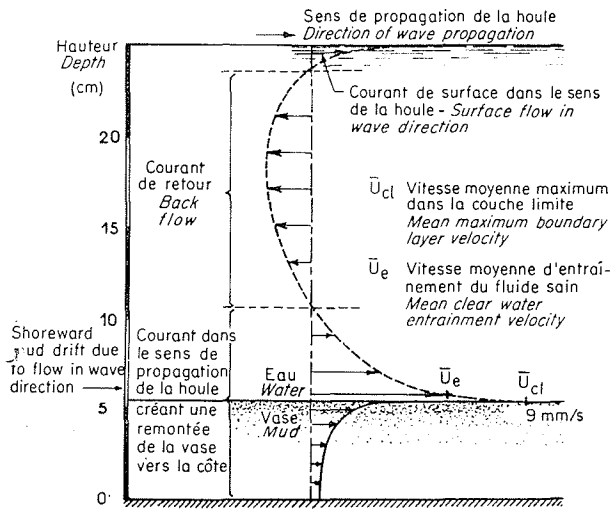
52/ Grand canal à houles.
The big wave flume.



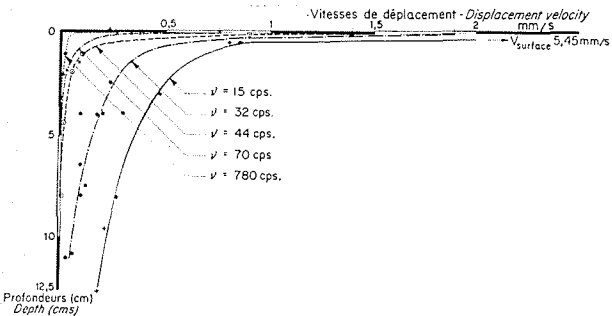
53/ Mouvements orbitaires dans un fluide.
Orbital motion in a fluid.



54/ Répartition des mouvements orbitaires dans des dépôts de vase plus ou moins consolidés. Distribution of orbital motion in mud, for various degrees of consolidation.

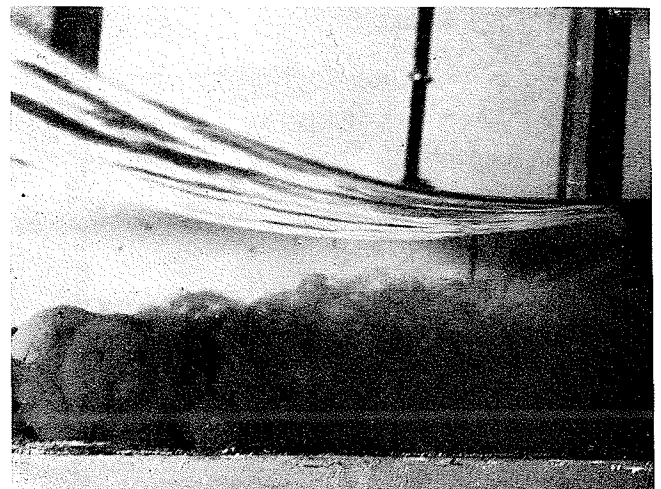


56/ Action d'un clapet de vent sur les fonds. Effect of a wind wave on the bed.



55/ Déplacement de la vase sous l'action de la houle. Mud movement due to waves.

57/ Remise en suspension de la vase dans le déferlement. Apparition de courant de turbidité. Mud put back into suspension by a breaker. Density current formation.



De même, si les fonds sont soumis non plus à des houles mais à des clapots de vent, il pourra exister une forte turbulence au voisinage des fonds et une remise en suspension des vases sans remontée vers le littoral.

Dans la zone de déferlement, par suite de la forte turbulence, les matériaux remontés du large dans le courant de translation seront remis en suspension sur toute la hauteur des eaux qui seront alors très chargées entre le point de déferlement et la côte. Un courant de turbidité peut alors prendre naissance dans la zone côtière, se superposer aux courants de compensation dus à la houle, et se propager vers les régions plus profondes où les particules se sédimentent.

La remise en suspension de la vase le long du littoral pourra cependant faire l'objet d'exceptions. Dans certains cas, la houle viendra mourir au rivage sans avoir déferlé; son mouvement se transmettra dans la couche de vase fluide sous-jacente et se propagera dans la masse même de la vase où elle s'atténuera par suite de la viscosité propre du matériau. La côte continuellement alimentée sera alors l'objet d'une forte sédimentation.

Sous les actions plus complexes de la houle sur des fonds constitués de sédiments péltiques, on retrouve toujours la même influence des caractéristiques des matériaux, de leur milieu aqueux et de leur état de tassement. Essentiellement variable dans le temps, les propriétés physiques dominantes de tels dépôts restent leur rigidité initiale et leur viscosité.

IV. - Conclusions

L'étude comparative des propriétés physiques des sédiments péltiques — du type vases, boues ou limons — et de leur comportement sous les actions hydrodynamiques, montre que, malgré la complexité des phénomènes, il existe un certain nombre de relations simples entre les différents paramètres représentatifs des complexes sol-eau.

La connaissance des caractéristiques minéralogiques, chimiques et granulométriques des particules élémentaires reste indispensable pour rechercher l'origine d'un dépôt et présumer de ses conditions de décantation en un point donné. La détection de traceurs naturels constitués par certains oligo-éléments contenus dans les sédiments et les méthodes modernes de traceurs radioactifs peuvent apporter des confirmations.

Par contre, pour définir la dynamique de ces sédiments très fins, dans leur milieu aqueux, un certain nombre de propriétés physiques fondamentales sont indispensables à préciser. Les recherches poursuivies au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.), pour le compte de différentes Administrations françaises et étrangères, ainsi que pour des Sociétés privées, tendent à montrer que les trois propriétés physiques fondamentales sont :

- la floculation des suspensions et, par extension, la vitesse de chute W_f des flocons aux différentes concentrations en particules solides et dans différents milieux aqueux;
- le tassement des dépôts au cours des temps, caractérisé par la variation moyenne de la

concentration T_s en particules et le gradient de concentration en fonction de la profondeur;

- les propriétés rhéologiques des dépôts aux différents stades de tassement et, plus particulièrement la rigidité initiale (τ_y) et la viscosité (ν), en fonction de leur concentration en particules solides.

Si, pour différents complexes sol-eau, ces trois propriétés physiques sont voisines, leurs suspensions et dépôts se comporteront de la même façon sous des actions hydrodynamiques.

En particulier, la pente $\text{tg } \alpha$ d'un talus de vase immergée ou émergée sera proportionnelle à la rigidité initiale τ_y du dépôt :

$$\text{tg } \alpha \approx K\tau_y$$

K étant voisin, pour certaines conditions de mesures et pour des dépôts immergés, de 25/100 si τ_y est exprimé en dynes/cm², et de 7/100 pour des dépôts émergés.

De même, la vitesse critique de frottement sur le fond U_c semble en première approximation pouvoir être rattachée à la rigidité initiale par l'expression :

$$U_c = 0,5 \tau_y^{1/2} \text{ avec } \tau_y \text{ en dynes/cm}^2$$

pour les dépôts ayant une rigidité initiale supérieure à 10 dynes/cm².

La même influence de la rigidité initiale et de la viscosité des dépôts se retrouve dans le comportement de différents sédiments péltiques, disposés dans différents milieux aqueux, sous l'action des courants de marée et de la houle.

Floculation, tassement, rigidité et viscosité des dépôts apparaissent dans tous les cas comme les paramètres physiques caractéristiques de l'évolution des complexes sol-eau sous les différentes actions hydrodynamiques. Il faut cependant attirer l'attention sur le fait que de tels paramètres restent encore difficiles à préciser avec exactitude, leurs valeurs quantitatives restant tributaires des conditions de mesures et devant être extrapolées avec beaucoup de réserves avant d'être généralisées.

Discussion

Président : M. TALUREAU

M. le Président présente M. MIGNIOT, Ingénieur au Laboratoire Central d'Hydraulique de France où ses recherches sur les modèles réduits à fond mobile pour l'étude des problèmes d'ensablement ou d'envasement en rivière ou à la mer, l'ont conduit à approfondir l'étude du comportement dans ces divers milieux, des sédiments très fins.

M. CHAMBOREDON demande quelle est l'influence des matières organiques — que contiennent souvent les vases — sur les propriétés étudiées.

M. MIGNIOT indique que dans les vases étudiées, le pourcentage de matière organique oscillait entre 0,10 et 2 %; l'influence de celles-ci se fait sentir principalement sur la rigidité; pour de plus amples précisions, il renvoie à une étude faite par M. RIVIÈRE, du Laboratoire d'Orsay, sur l'influence des matières organiques sur différents types d'argile.

M. JOHNSON remarque que les valeurs de la « rigidité initiale » (τ_y), utilisées par M. MIGNIOT dans l'établissement

des expressions qu'il a présentées pour la vitesse d'entraînement et pour la pente d'équilibre de vases, ont été obtenues à partir d'essais au viscosimètre; elles correspondent donc aux caractéristiques d'un matériau remanié. Or, la rigidité d'une vase en place pourrait être assez différente de la rigidité de cette même vase remaniée.

M. JOHNSON demande si M. MIGNIOT a eu l'occasion d'effectuer des mesures comparatives des deux états d'une même vase en utilisant pour les mesures en place, soit un scissomètre à croisillon, soit le nouvel appareil décrit par M. BIAREZ.

M. MIGNIOT reconnaît l'intérêt de telles mesures, mais il n'a pu que comparer les valeurs de la rigidité initiale, obtenues par divers laboratoires par des mesures de pressions, avec celles données par des appareils à corps tournants: les valeurs numériques sont différentes, mais les lois d'évolution présentent la même allure, de sorte que les valeurs du coefficient K ne sont pas les mêmes.

M. MIGNIOT précise également que les résultats donnés dans son exposé concernent des essais en canaux exécutés en laboratoire et pour lesquels des mesures sur la vase « en

place » étaient faites au moyen d'un appareil à corps tournant. Ces mesures, possibles en laboratoire, deviennent difficiles en nature, mais ne semblent pas impossibles; on peut penser que dans les deux cas, les lois resteraient sensiblement les mêmes, du moins qualitativement.

M. BIAREZ formule les remarques suivantes:

« 1° Les mesures par scissomètre peuvent être très différentes, sur la même vase, au laboratoire et *in situ*. Ceci dépend en particulier, de la thixotropie; mais celle-ci peut être très variable d'une vase à l'autre. La différence dépend, en outre, du mode de malaxage et du temps de repos en laboratoire. Dans quelques cas particuliers, nous avons trouvé des variations de 1 à 5;

« 2° Les angles de stabilité des pentes de vases doivent varier fortement avec la hauteur des talus. »

M. MIGNIOT confirme l'influence de la hauteur sur la pente d'un talus, mais rappelle que toutes les mesures dont il a parlé ont été faites au laboratoire avec une hauteur constante (40 cm).

M. le Président remercie M. MIGNIOT.

Abstract

A study of the physical properties of various forms of very fine sediment and their behaviour under hydrodynamic action

by C. Migniot *

A comparative study of the physical properties of pelitic sediment of the mud, silt or sludge type and of its behaviour under hydrodynamic action shows that in spite of the complexity of the phenomena involved, there are a certain number of simple relationships between the various representative parameters for soil-water complexes.

The mineralogical, chemical and grain size characteristics of element particles must be known in establishing the origin of a deposit and making assumptions about the conditions under which it settled out at a given point. Such data can be confirmed by the detection of natural tracers in certain oligo-elements found in sediment, and by modern radioactive tracer techniques.

In order to be able to define the dynamics of this very fine sediment in its natural water medium, however, it is necessary to establish precisely a certain number of basic physical properties. Laboratory research for various French and foreign government departments and private firms tends to show that the following are the three basic properties involved:

- (i) Flocculation of suspensions, and hence also the floc sinking rate W_f for various solid particle concentrations and water media;
- (ii) The bedding-down of deposits in time, the characteristic feature of which is the mean particle concentration variation T_s and the concentration gradient with depth;
- (iii) The rheological properties of the deposits at the various bedding-down stages, and more especially initial rigidity (τ_y) and viscosity (ν) variations with solid particle concentration.

Where these three physical properties are similar in different soil-water complexes, suspensions and deposits of the latter also behave similarly under hydrodynamic action. In particular, the slope of a submerged or emergent mud bank, $\tan \alpha$, for an assumed 40 cm height of deposit will be proportional to the initial deposit rigidity τ_y , as follows:

$$\tan \alpha = K\tau_y$$

where for given measurement conditions K is around 25/100 for a submerged deposit, and 7/100 for one above water, τ_y being in dynes/cm².

Similarly, it seems that the critical bed friction velocity U. can as a first approximation be related to initial rigidity by the following expression:

$$U. = 0,5 \tau_y^{1/2}$$

where τ_y is in dynes/cm² for deposits with an initial rigidity greater than 10 dynes/cm².

This effect of initial deposit rigidity and viscosity is also found in the behaviour of various forms of pelitic sediment scattered within various water media by wave and tide current action.

Flocculation, bedding-down, rigidity and viscosity of deposits invariably turn out to be characteristic parameters for the behaviour of soil-water complexes under various forms of hydrodynamic action. It should be noted, however, that accurate determination of this type of parameter still remains a difficult matter and that its quantitative values depend on measurement conditions, so that any extrapolations must remain subject to considerable caution.

* Ingénieur, Chef du Service de Sédimentologie du Laboratoire Central d'Hydraulique de France.