

Tassement et rhéologie des vases

Deuxième partie

C. Migniot

Docteur ès Sciences — Conseiller scientifique Sogreah-LCHF

avec la participation

du Service technique central de la Direction des Ports et Voies navigables
et de la Mission de la recherche du Secrétariat d'Etat à la mer

3. Rhéologie des vases, limons et boues

La seule connaissance de la densité, de la teneur en eau ou de la concentration en sédiments secs d'une vase ou d'un limon est insuffisante pour se faire une idée précise de sa consistance. Un complexe sol-eau pourra en effet être liquide, plastique ou solide, pour une même concentration, suivant la granulométrie de ses particules et leur minéralogie ainsi que de la composition des eaux interstitielles.

L'étude rhéologique des sédiments fins permet de déterminer des paramètres importants pour préciser le comportement de ces mixtures de vases ou de boues et définir, par des valeurs numériques, les caractéristiques physiques d'un dépôt en cours de consolidation sous l'eau ou hors d'eau. Il sera possible ensuite de rattacher les conditions de transport de mixtures d'éléments fins, sous l'action des courants ou de la houle ainsi que les écoulements gravitaires et les pentes d'équilibre des dépôts, aux valeurs rhéologiques mesurées en laboratoire ou sur le terrain à l'aide d'appareils relativement simples.

Ces mesures rhéologiques portent principalement sur la définition de la viscosité et de la rigidité initiale (yield value) ainsi que sur la thixotropie ou dilatace du milieu que l'on peut mettre en évidence par l'étude de la variation des valeurs du cisaillement des dépôts en fonction de la vitesse d'un rotor immergé dans la suspension.

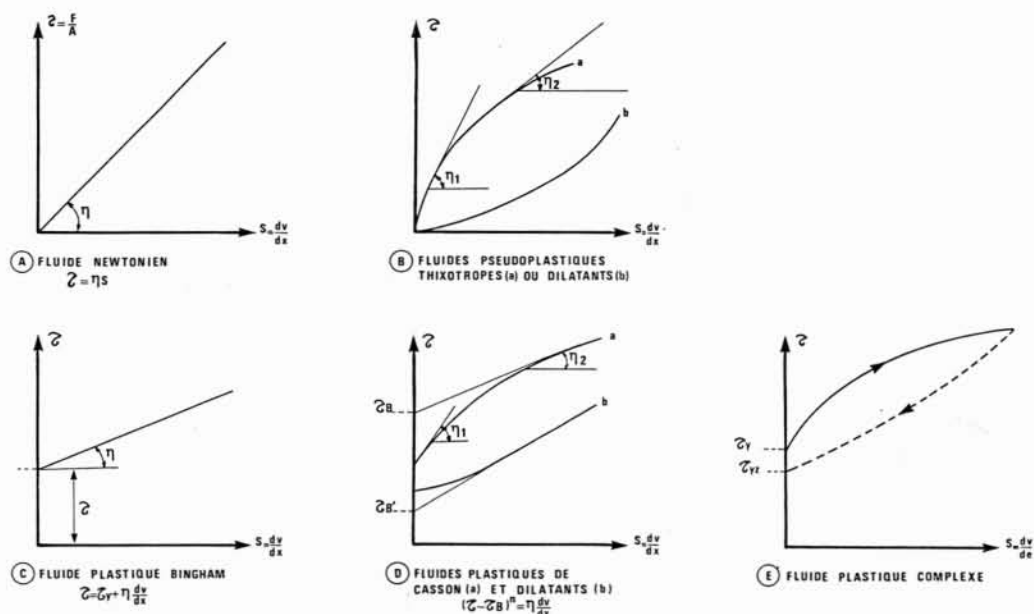
Dès 1950, le Laboratoire central d'hydraulique de France (L.C.H.F.) mettait au point une méthodologie d'étude rhéologique des vases qui permettait de classer les différentes mixtures de sédiments marins, estuariens ou fluviaux, en fonction des variations de leur rigidité initiale, de leur viscosité et de la concentration. Le type d'appareil utilisé, les conditions expérimentales devaient être soigneusement respectées pour que les valeurs obtenues puissent être comparées entre elles et rattachées au comportement de ces sédiments sous les actions hydrodynamiques. Les résultats étaient plus comparatifs que quantitatifs mais apportaient déjà des informations très utiles pour les hydrauliciens [4-5-14].

La nécessité d'augmenter la précision dans les valeurs de viscosité et de rigidité, afin de pouvoir les introduire dans les équations de la dynamique sédimentaire, ainsi que l'intérêt de pouvoir rattacher les valeurs de rigidité, mesurées sur des mixtures en cours de consolidation, aux valeurs de cohésion applicables aux sols compactés, nous a obligés à apporter des améliorations dans la méthodologie des études rhéologiques, et surtout dans le calcul des paramètres qui en découlent.

Tous les résultats donnés dans cet exposé tiennent compte de cette nouvelle technologie qui, si elle ne change absolument pas les résultats qualitatifs obtenus antérieurement, permet de préciser les valeurs numériques, en particulier de la rigidité initiale [24].

Bedding-down and rheology of muds

The knowledge of bedding-down conditions of very thin sediment deposits — of the muds, silts or alluvium type — and their consistency modifications day after day is a primordial element to tackle silting problems in a site and to search means which suits the best to find a solution. This article presented in two successive issues of the « Houille Blanche » provides a synthesis of various researches carried out during the twenty last years by le Laboratoire Central d'Hydraulique de France, relating to mud bedding-down and rheology. Thanks to results obtained on sediments of very different mineralogical, chemical and granulometrical types, associated to waters more or less rich in salts a certain number of empirical laws on the evolution of deposits density and rigidity can be expressed. Presumptions can be made on the angles of repose of banks and on their conditions of entrainment and transport by currents and swell taking the mechanical characteristics of these deposits into account.



31. Propriétés rhéologiques des fluides.

3.1. Généralités et méthodologie de mesures

Généralités

La rhéologie peut être considérée comme la science de l'écoulement et de la déformation de la matière. La résistance des corps à la déformation est due au frottement qui se produit entre les molécules lorsque celles-ci se déplacent ; elle dépend de la cohésion moléculaire des corps [15].

Dans le cas d'un fluide, la force de frottement peut être figurée par l'énergie nécessaire pour déplacer une couche de fluide sur une autre. Si deux plans parallèles du fluide de même surface A , distants l'un de l'autre de dx , se déplacent dans la même direction à des vitesses V_1 et V_2 , la force F nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse dv est pour un fluide newtonien :

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} = \tau$$

η est la viscosité dynamique du fluide ; elle s'exprime en poise dans le système c.g.s.

$\frac{dv}{dx} = S$ est le gradient de vitesse ; c'est la mesure de la vitesse à laquelle les différentes couches se déplacent les unes par rapport aux autres. Il représente le taux de cisaillement auquel le fluide est soumis.

$\frac{F}{A}$ indique la force par unité de surface nécessaire pour produire le cisaillement : c'est la force de cisaillement.

$$\frac{\tau}{S} = \frac{\text{effort de cisaillement}}{\text{taux de cisaillement}} = \eta$$

Un liquide qui exige un effort de cisaillement de 1 dyne/cm² pour produire un taux de cisaillement de 1 cm/s a pour définition une viscosité de 1 poise.

Pour un fluide newtonien τ/S est constant. C'est le cas, par exemple, de l'eau, de l'huile, de la glycérine. Dans ce cas, la relation entre la force de cisaillement τ et le taux de cisaillement S est une droite. La courbe caractéristique passe par l'origine et la viscosité reste liée à la pente de la droite (fig. 31A).

Pour les fluides plastiques, la relation n'est linéaire qu'à partir d'une certaine vitesse, au-delà la courbe est croissante et coupe l'axe des abscisses en un point qui représente la contrainte critique d'écoulement des fluides plastiques ou de Bingham (fig. 31C). Il faut appliquer une certaine force aux fluides avant que le mouvement ne se produise. Cette force est la « yield value » ou rigidité initiale.

L'équation de fluide de Bingham s'écrit :

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dx}$$

τ_y étant la tension en dessous de laquelle il n'y a pas de mouvement.

η étant la viscosité dynamique qui dans le cas d'un fluide de Bingham pur serait une constante.

En fait de nombreuses suspensions — dont les mixtures de vases ayant une concentration appréciable — ne suivent pas la loi de Bingham et après avoir dépassé la limite d'écoulement, la variation de la force de cisaillement τ en fonction du gradient de vitesse dv/dx n'est pas une loi linéaire mais se présente suivant une courbe concave ou convexe, suivant que la suspension est thixotrope ou dilatante (fluide de Casson). La visco-

sité de ce type de mixture n'est plus constante mais varie en fonction du gradient de vitesse. Certains auteurs admettent alors que la contrainte de cisaillement τ_B peut être définie à partir de la tangente à la courbe rhéologique.

Cette valeur arbitraire de la contrainte de cisaillement est différente de la rigidité initiale « vraie » que l'on peut définir comme étant le début d'entraînement d'un rotor immergé dans une suspension (fig. 31D) et à laquelle on peut rattacher le comportement des mixtures de vases sous les actions hydrodynamiques.

Les fluides pseudoplastiques formeraient un groupe intermédiaire entre les fluides newtoniens et plastiques, la courbe coupe l'axe des abscisses à son origine (fig. 31B) mais la viscosité décroît lorsque le taux de cisaillement augmente.

Dans les fluides dilatants le phénomène est inverse et la viscosité croît avec le taux de cisaillement. Ce cas peut se rencontrer dans certaines suspensions aqueuses où les particules tendraient, en se sédimentant, à adopter une configuration telle qu'elles ne se touchent pas ; deux grains voisins étant séparés par de l'eau et pouvant « glisser » l'un sur l'autre sans frottement solide. Pour une déformation très lente, une telle suspension réagirait comme un liquide et se comporterait, au contraire, comme un solide, si on la soumettait à une déformation rapide, les grains rentrant en contact les uns avec les autres.

Les fluides thixotropiques voient, à l'inverse des fluides dilatants, leur viscosité diminuer — avec un certain retard — sous l'effet de l'agitation. Le diagramme, couple de cisaillement — vitesse du rotor, présente une courbe décalée en vitesse décroissante avec des valeurs du couple inférieures. L'importance de la thixotropie est mise en évidence par l'ampleur de la boucle ainsi décrite.

Enfin, certains fluides ont des comportements complexes (fig. 31E), la valeur de l'effort de cisaillement en fonction du taux de cisaillement n'étant pas la même suivant que l'on est en vitesse croissante ou décroissante.

Les suspensions de sédiments fins, dans différents milieux aqueux, pourront suivre des lois rhéologiques différentes suivant leur état de tassement ou, ce qui revient au même suivant leur concentration.

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

Méthodologie de mesures

Les caractéristiques rhéologiques, et notamment la rigidité et la viscosité ont été définies à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux, de type Brookfield, qui permet de mesurer la force nécessaire pour faire tourner un axe, ou rotor, dans un fluide [15-16-17-18].

L'entraînement du rotor, de géométrie donnée, s'effectue par un ressort étalonné dont le couple de

torsion est linéaire et atteint 674 dynes/cm pour une déviation totale correspondant à la graduation 100 sur le cadran de mesure.

Le couple de torsion dépendra de la vitesse du rotor et de ses caractéristiques géométriques et l'on pourra pour chaque axe utilisé, établir une corrélation entre le couple et la viscosité d'un fluide newtonien.

De même il sera possible d'établir pour un fluide ou une suspension déterminée, une courbe rhéologique c'est-à-dire une courbe donnant la variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse du rotor.

A partir de ces mesures, on peut définir :

— la rigidité initiale τ_y définie comme étant la tension en dessous de laquelle il n'y a pas de mouvement de fluide ou de la suspension et correspondant au couple nécessaire pour provoquer le début d'entraînement du rotor soumis à la torsion du ressort étalonné.

La rigidité s'exprime en N/m^2 (pascal) ou en $dynes/cm^2$

$$1 N/m^2 = 10 dynes/cm^2 = 0,1 kgf/m^2$$

— la viscosité dynamique relative de la suspension η_r , qui correspondrait à la viscosité d'un fluide newtonien qui donnerait dans les mêmes conditions de mesures (appareil utilisé, rotor, vitesses...) le même couple de cisaillement que celui mesuré dans la suspension. Cette viscosité s'exprime en poises (dans le système c.g.s.) et n'a qu'une valeur comparative.

Dans le système légal l'unité est le poiseuille PI (pascal-seconde)

$$1 PI = 1 kg/m.s = 10 poises = 10^{-3} t/m.s (M.T.S.)$$

$$1 centipoise = 10^{-3} kg/m.s$$

— la viscosité dynamique absolue η qui est déduite des courbes rhéologiques, c'est-à-dire des courbes donnant la variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse du rotor. Cette viscosité pourra être différente, pour les fluides de Casson, suivant la partie de courbe utilisée. Dans le cas des vases et compte tenu de l'appareil (viscosimètre Brookfield L.V.T.) on a admis que la viscosité absolue pouvait être déduite des mesures faites sur les vitesses les plus élevées de 30 et 60 t/min et correspond à un gradient de vitesse de $3,14 S^{-1}$.

$$\eta = \frac{\tau_{60} - \tau_{30}}{3,14 S^{-1}}$$

— la thixotropie ou la dilatançe qui sont appréciées en fonction des courbes rhéologiques ascendantes et descendantes et des comparaisons entre les rigidités initiales mesurées sur des vases fraîchement malaxées et sur ces mêmes vases laissées au repos pendant des durées plus ou moins importantes.

Dans tous les cas des précautions doivent être prises pour obtenir non seulement des résultats comparatifs mais ayant des valeurs précises. Une méthodologie a été mise au point dans ce but afin de tenir compte :

— de la tension entre métal-sol et éviter des glissements entre le rotor lisse et les vases ;

— de l'âge de la suspension en laissant un temps de repos suffisant après malaxage de la suspension pour que les effets thixotropiques s'atténuent (quelques minutes) ;

- de la température en adoptant une valeur constante de 20 °C ;
- des caractéristiques géométriques du récipient contenant la suspension et, de ce fait de la distance entre le rotor et le récipient. Si cette distance n'affecte pas la mesure de rigidité elle peut modifier les valeurs de la viscosité si l'on ne prend certaines précautions ;
- de la durée des mesures pour chaque palier de vitesses en vue de tracer la courbe rhéologique...

Pour les très fortes concentrations, les mesures rhéologiques ont été faites en utilisant le matériel adapté à la mécanique des sols et en déterminant en particulier la cohésion non drainée C_u ou capacité d'un élément de sol à résister à la contrainte de cisaillement sous pression nulle.

Dans le système c.g.s. la cohésion s'exprime en g/cm^2 , elle s'exprime en N/m^2 (ou pascal) dans le système légal.

Cette cohésion a été mesurée à l'aide d'un scissomètre à croisillons métalliques ou à l'aide d'un rhéotest utilisé au laboratoire de l'Ecole Centrale.

3.2. Comportement rhéologique des vases de différentes origines

3.2.1. Loi générale

Une suspension de sédiments fins dans un milieu aqueux déterminé peut prendre les apparences d'un fluide visqueux et s'écouler très facilement lorsqu'on déverse la mixture sur un sol, d'un fluide plastique, ayant la consistance de crèmes plus ou moins solides, enfin d'un véritable solide pouvant conserver une forme propre après façonnement.

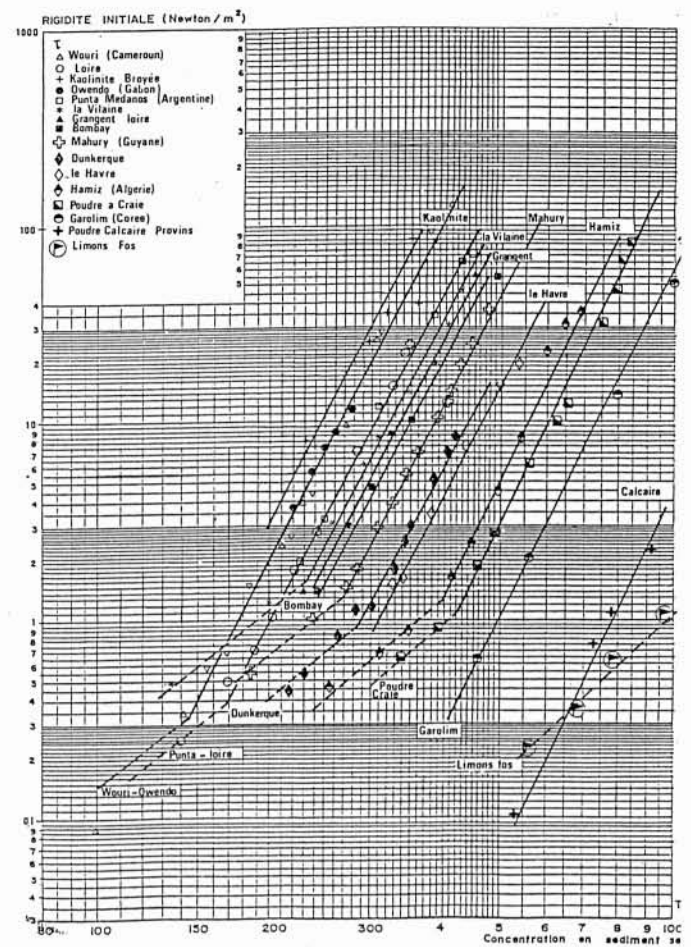
Les mesures de rigidité initiale τ_y et de viscosité relative ou absolue η effectuées à l'aide d'un viscosimètre Brookfield, ou pour les très fortes concentrations les mesures de cohésion avec un scissomètre ou un rhéotest, permettent de relier ces valeurs à la concentration en sédiments secs T_s par une loi en puissance de la forme :

$$\tau_y = b T_s^a$$

τ_y étant exprimé en N/m^2 et T_s en g/l .

La recherche du meilleur ajustement possible d'une telle loi, par la méthode des moindres carrés, a conduit à déterminer pour chaque vase une valeur de la concentration en sédiment sec T_s (et donc une valeur correspondante de τ_y) de part et d'autre de laquelle les valeurs de l'exposant a et du coefficient b sont différentes. On a pu constater que, d'une manière générale, les mixtures de vases fluides ont une valeur de coefficient a voisine de 3, alors que les vases plastiques ou rigides présentent une variation de la rigidité initiale comme la sixième puissance de la concentration T_s .

Ce passage de l'état liquide à l'état plastique, correspondant à une valeur de la rigidité initiale de l'ordre de 1 à 3 N/m^2 (la valeur étant d'autant plus élevée que le sédiment est plus fin), se retrouvera dans toutes les lois de transport des vases, limons ou boues avec des



32. Rigidité initiale de vases de différentes origines.

ajustements différents suivant que l'on est dans un domaine ou un autre :

- vases fluides : $\tau_y = b T_s^3$
- vases plastiques : $\tau_y = b' T_s^6$
- vases solides (cohésion) : $C_u = b'' T_s^6$.

Il est bien certain que ces lois établies à partir d'une étude statistique sur un grand nombre d'échantillons pourraient être affinées pour certains, mais les ordres de grandeur resteront valables ou suffisants pour les études d'hydrodynamique sédimentaire.

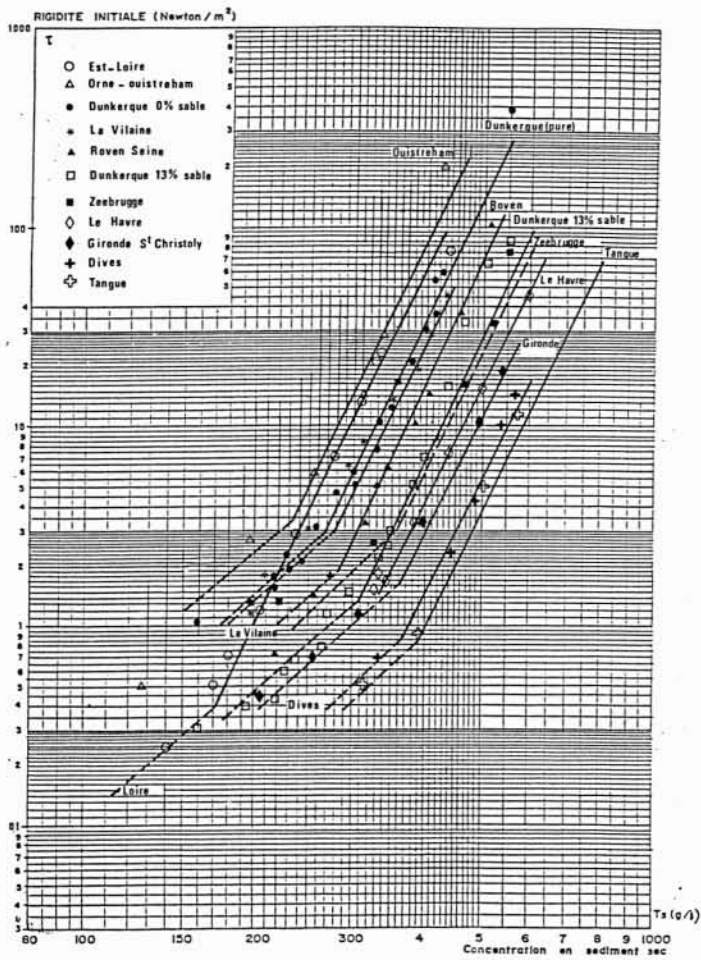
3.2.2. Variation de la rigidité et de la viscosité relative de différentes vases d'origine marine, équatoriale, fluviale et industrielle

La rigidité initiale τ_y et la viscosité relative η_r varient considérablement en fonction de la nature et de l'origine des mixtures de sédiments fins (fig. 32).

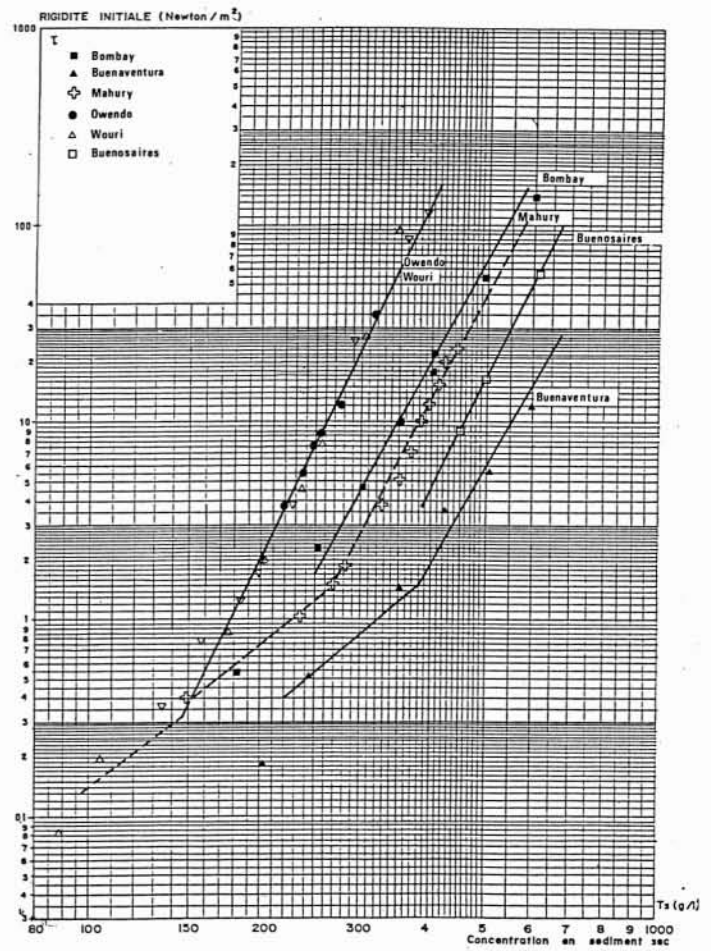
On retrouve dans cette diversification celle que l'on avait observée pour le tassement des sédiments fins en fonction du temps.

D'une façon très générale, il apparaît que, à concentration égale en sédiments secs dans la suspension, la rigidité initiale et la viscosité relative sont d'autant plus élevées que les sédiments sont fins. Une vase équatoriale de quelques dizaines de micromètres de diamètre pourra être 1 000 fois plus rigide qu'un limon fluvial.

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau ci-après les valeurs moyennes des rigidités correspondant à



33. Rigidité initiale de vases marines du littoral français.



34. Rigidité initiale de vases équatoriales.

différentes vases ayant les mêmes concentrations en particules solides.

VALEURS DE LA RIGIDITÉ τ_y en N/m^2								
Origine	Wouri	Gabon	La Vilaine	Bombay	Dunkerque	Le Havre	Hamiz	Garolim
Concentration en g/l	200	250	110	500	240	100	37	8
200	2,2	1,8	1	0,7	0,35	0,2	-	-
300	21	20	5,5	4	1,3	0,8	0,4	-
500	400	350	110	70	18	15	4,5	1
700	-	2500	900	500	240	100	37	8

Pour les viscosités absolues définies à partir de la tangente à la courbe rhéologique correspondant aux vitesses du rotor de 30 et 60 tr/mn, on trouve une loi de variation, en fonction de la concentration de particules solides, ayant de grandes analogies avec celle donnée pour la rigidité. A titre indicatif, le tableau ci-après donne quelques valeurs de la viscosité absolue pour les vases du Wouri (Cameroun) et celles de Dunkerque :

VISCOSITÉ ABSOLUE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION T_s en g/l					
Vase Wouri concentration (g/l)	150	200	250	300	350
Viscosité (en poises)	0,2	1,1	5	17	50
Vase Dunkerque concentration (g/l)	300	350	480	570	535
Viscosité (en poises)	11	9,5	41	59	64

Vases du littoral français

La figure 33 donne une comparaison rhéologique entre différentes vases prélevées long du littoral français. On retrouve une très grande variation de la rigidité en fonction de la concentration en particules solides, bien que l'on ait éliminé les particules grossières, supérieures à 40μ , des échantillons analysés. Nous verrons ultérieurement que la rigidité — et la viscosité — des vases peut varier dans des proportions très appréciables en fonction du pourcentage de sable contenu dans l'échantillon.

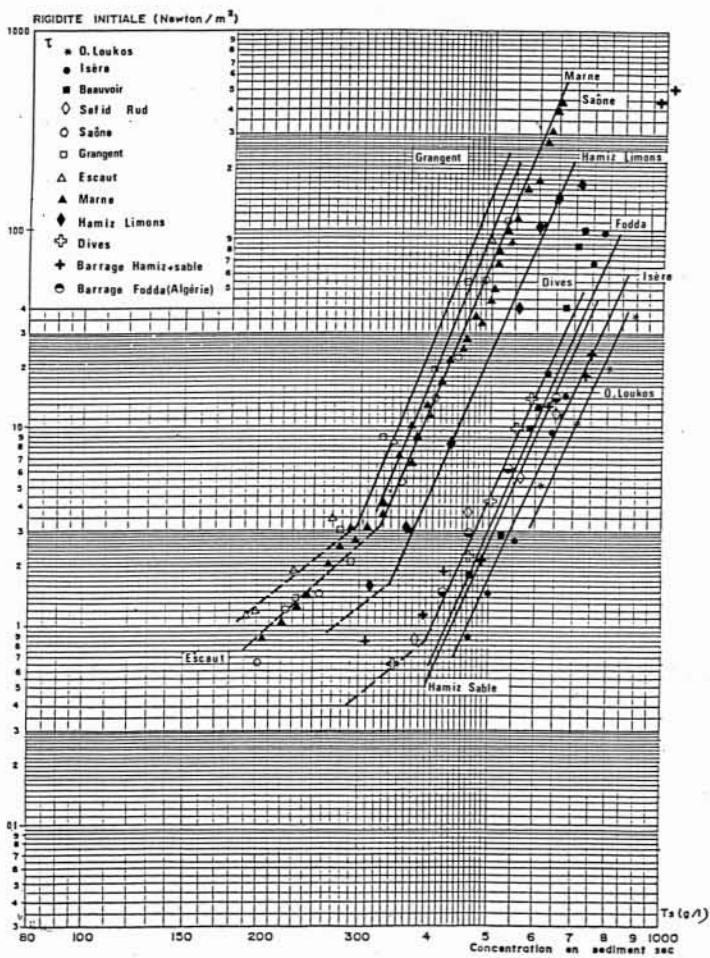
On constate, comme précédemment, une loi de variation différente pour les vases fluides, dont la rigidité est inférieure à 1 ou 3 N/m^2 , et pour les vases plastiques plus concentrés.

Le tableau ci-après donne les valeurs du coefficient b propre à chaque vase plastique en admettant une loi générale de la forme :

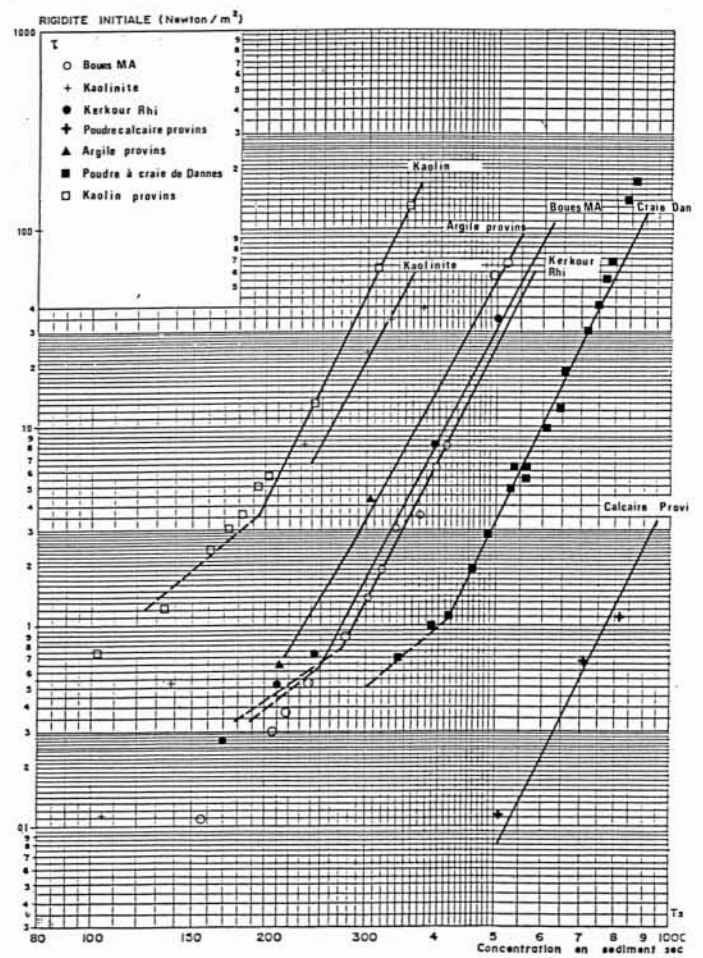
$$\tau_y (N/m^2) = b T_s^6 (g/l)$$

Origine	Orne Ouissehram	Loire	Dunkerque	La Vilaine	Seine Rouen	Gironde	Le Havre	Dives	Mt. St Michel
$b/10^{-15}$	11,5	21	9	6	4	2,4	0,92	0,36	0,26

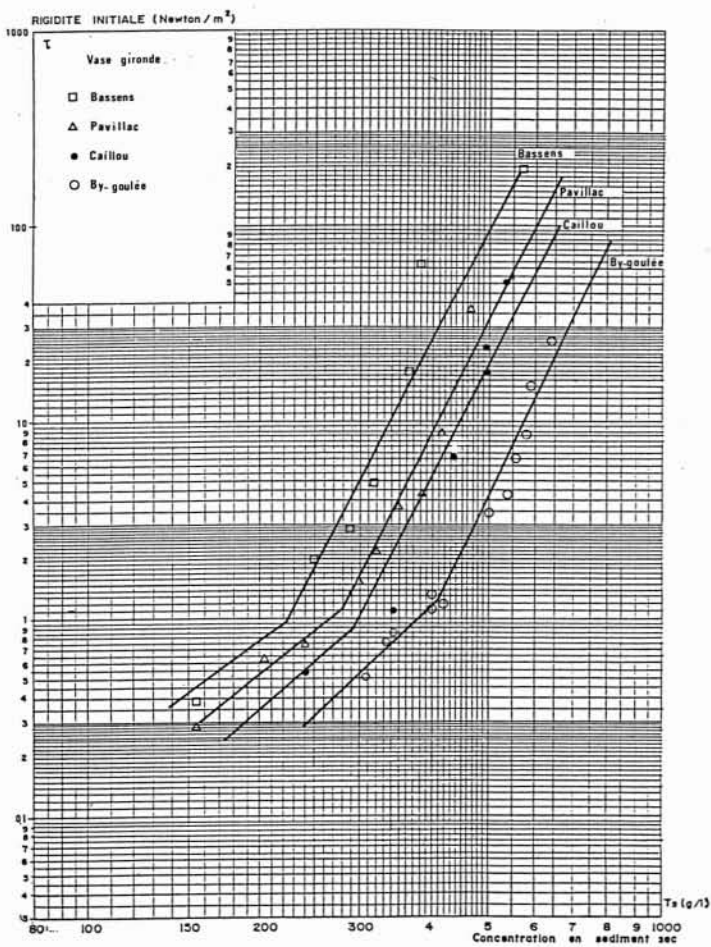
A titre d'exemple, pour une vase à Dunkerque de 300 g/l, on aurait une rigidité initiale théorique de l'ordre de $\tau_y = 910^{-15} \cdot 300^6 = 6,6 N/m^2$.



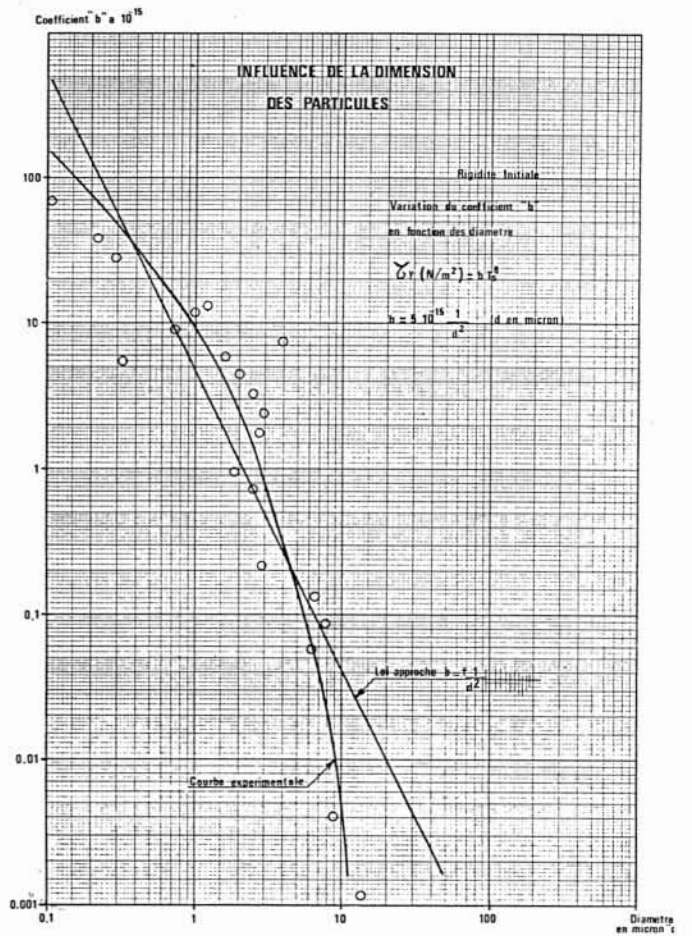
35. Rigidité initiale de vases et limons fluviaux.



36. Rigidité initiale de boues et déchets industriels.



37. Rigidité initiale des vases d'un même site.



38. Influence de la dimension des particules sur la rigidité initiale.

Le rapport entre les rigidités pour deux vases extrêmes telles que la vase de la Loire et la tange du Mont-Saint-Michel serait de $R = 21/0,26 = 80$.

On voit que le terme de concentration en sédiments secs (ou de la teneur en eau) est très insuffisant pour préciser les caractéristiques mécaniques d'une vase, même dans nos régions tempérées où l'on pourrait s'attendre à une certaine constante minéralogique dans les sédiments littoraux.

Vases équatoriales et étrangères

On retrouve dans ces vases les mêmes diversités que sur les vases du littoral français (fig. 34), les vases très fines à dominante kaolinite du Wouri (Cameroun) et d'Owendo (Gabon) étant, à concentrations égales en sédiments secs, nettement plus rigides que les autres vases avec un coefficient b atteignant 30 à $35 \cdot 10^{-15}$.

Vases et limons fluviaux

Les vases et limons fluviaux ont, en général, des rigidités plus faibles, à concentrations égales en particules solides, que les vases marines (fig. 35).

On constate que les différents sédiments se regroupent autour de deux lois préférentielles correspondant, d'une part, aux limons rencontrés dans les rivières à fortes pentes ou à régime torrentiel (Hamiz, Isère, Loukos...) d'autre part à des éléments plus fins qui se déposent dans les rivières à faibles pentes (Marne, Escaut, Saône...).

En rattachant tous ces matériaux au même type d'équation que les autres sédiments étudiés, c'est-à-dire en admettant une loi approchée de variation de la rigidité en fonction de la sixième puissance de la concentration en sédiments pour les mixtures plastiques, on aurait un coefficient b qui aurait les valeurs suivantes :

— limons — rivières à fortes pentes : $b = 0,32 \cdot 10^{-15}$ à $0,085 \cdot 10^{-15}$

— vases — rivières à faibles pentes : $b = 6,5 \cdot 10^{-15}$ à $1,6 \cdot 10^{-15}$.

Précisons que l'on retrouve toujours une cassure dans les courbes pour des valeurs comprises entre 3 N/m^2 et $0,7 \text{ N/m}^2$ avec séparation de part et d'autre de ces valeurs entre les vases fluides et les vases plastiques.

Boues et déchets industriels

Dans ce domaine, on observe une très grande diversité des rigidités en fonction des concentrations, ce qui est normal compte tenu de la grande variété des matériaux étudiés qui vont depuis les argiles utilisés en céramiques jusqu'aux poudres calcaires en passant par les montmorillonites de la laverie des phosphates de Ker Kour et les boues chimiques de La Hague.

Chaque type de boue a une courbe qui lui est propre et que l'on ne peut pas généraliser. On sait simplement que l'on peut obtenir des rigidités et des viscosités très différentes pour une même concentration (rapport de 1 à 10 000 dans certains cas) (fig. 36).

Diversité dans un site déterminé

Les propriétés rhéologiques des vases rencontrées dans un même site, que ce soit un estuaire ou une zone

portuaire, peuvent présenter des différences appréciables par suite des variations qui existent dans la granulométrie des échantillons et les caractéristiques chimiques et minéralogiques.

Si l'on retrouve un cortège minéralogique ayant des analogies, certains éléments peuvent devenir prépondérants dans un secteur plutôt que dans un autre. En particulier, le pourcentage des matières organiques peut varier sensiblement ; il en sera de même des pourcentages de silts et de sables entraînant dans un même lieu des variations appréciables dans les tassements et les courbes rhéologiques.

C'est ainsi qu'en Gironde [3], sur 5 échantillons prélevés entre la passe de By Goulée et la souille de Bassens, on trouve, comme il a été dit, des granulométries qui s'échelonnent entre 2,5 et 11 μ avec des pourcentages de sable variant de 0,8 % à 20 %. Les courbes de rigidité sont affectées par ces modifications, comme on peut le constater sur la figure 37 et dans le tableau ci-après :

		RIGIDITÉ INITIALE EN N/m^2				
Concentration en sédiments (g/l)		200	300	400	500	600
Echantillons	Diamètres microns					
N° 2 By Goulée	10	-	0,36	0,9	3,2	10
N° 3 Caillou	6,2	0,25	0,7	3,4	16	40
N° 4 Pauillac	5,1	0,3	1,1	7	38	-
N° 5 Bassens	6,4	0,45	3,2	26	120	-

Dans un même estuaire, la rigidité initiale peut varier dans un rapport de 40 pour des mêmes concentrations apportant la preuve que la seule connaissance de la teneur en sédiments secs dans un dépôt n'est pas suffisante pour apprécier son état mécanique.

3.3. Influence de différents paramètres sur le comportement rhéologique des vases

Le comportement rhéologique d'une mixture de sédiments fins à très fins dépend, comme le tassement, de très nombreux paramètres. Granulométrie et nature minéralogique des sédiments, pourcentages de silts et de sables mélangés aux vases, nature des eaux interstitielles, matières organiques, température, actions mécaniques sont à prendre en considération pour définir la rigidité initiale et la viscosité.

3.3.1. Influence de la nature et de la dimension des particules

D'une façon générale, la rigidité initiale est d'autant plus élevée — à concentrations égales en particules solides — que le sédiment est plus fin. Une vase très fine, équatoriale, à dominante d'argile kaolinite, aura une rigidité beaucoup plus forte qu'un limon de rivière de quelques dizaines de microns.

Une loi de variation du coefficient b , donnant la variation de la rigidité en fonction de la concentration, a été recherchée en admettant comme diamètre des particules de diamètre moyen d de la mixture (fig. 38).

Un ordre de grandeur peut être donné en prenant l'équation $\tau_y = b Ts^6$, avec $b = 5 \cdot 10^{-15}/d^2$.
 τ_y en N/m^2 , d en μm , Ts en g/l .

Par exemple, une vase ayant un diamètre moyen de 2μ et une concentration de $400 g/l$ aurait une rigidité théorique de $5,1 N/m^2$.

En fait, la seule connaissance du diamètre moyen d'une mixture de vase n'est pas suffisante pour définir son comportement rhéologique, et des résultats assez différents peuvent être obtenus lorsque la répartition granulométrique varie autour de ce diamètre moyen. En admettant que la rigidité varie d'une façon inversement proportionnelle à la surface spécifique des grains, ou au carré de leur diamètre moyen, on peut ne fournir que des ordres de grandeur qu'il est souhaitable de contrôler par des mesures en laboratoire.

Le tableau ci-après donne quelques valeurs des coefficients b en fonction de l'origine et de la granulométrie des sédiments en admettant que la rigidité est une puissance sixième de la concentration :

Origine	Kaolin broyé.	Wouri	Owendo	Bombay	Dunkerque	Buenos-Aires
d moyen en microns	0,1	0,2	0,3	0,35	0,75	1
$b/10^{-15}$	68	32,5	29	5,5	9	12
Origine	Punta Medanos	La Vilaine	Rouen	Le Havre	Gironde	Jakarta
d moyen en microns	1,3	1,6	1,8	2	2,5	3
$b/10^{-15}$	13,7	6	4	1	0,75	2,4
Origine	Zeebrugge	Dives	Tanger	Craie	Isère	Calcaire
d moyen en microns	2,8	4	4	3	6,5	9
$b/10^{-15}$	1,8	0,36	0,26	0,4	0,13	0,004

Ce coefficient b peut varier dans des limites importantes allant de 0,001 (Limon de Fos) à 70 pour des vases ou des argiles très fines (Kaolin), le rapport dépassant 100 000 entre les extrêmes des matériaux étudiés.

Pour la *viscosité absolue* en fonction de la concentration en particules solides, on retrouve une loi de variation comparable en cinquième ou sixième puissance de la concentration mais les écarts entre les valeurs du coefficient b sont plus faibles. Toutes les viscosités se regroupent autour d'une même loi approchée de la forme :

$$\eta \text{ (en poises)} = 16,8 \cdot 10^{-15} Ts^6$$

En fait, le coefficient b est compris entre $40 \cdot 10^{-15}$ pour les vases fines du Wouri ($0,2 \mu$) et $6,5 \cdot 10^{-15}$ pour les vases plus grossières de Zeebrugge ($2,8 \mu$). On ne dispose pas de valeurs pour les limons fluviaux.

Pour les fortes concentrations, les mesures de *cohésion non drainée* faites à l'aide d'un scissomètre donnent des résultats assez comparables à ceux obtenus pour la rigidité initiale [18-19-20].

On constate que la cohésion varie comme la puissance 5,5 à 6 de la concentration et que les valeurs sont d'autant plus élevées que le sédiment est fin (fig. 39).

$$Cu \text{ (en } N/m^2) = b' Ts^6$$

Le tableau ci-après donne quelques valeurs des coefficients b' en admettant que la cohésion varie comme la sixième puissance de la concentration en sédiments secs :

Origine	Punta Medanos	Honfleur	Grangent	Mahury	Buenos Aires	Dives	Corée Garolir
$b'/10^{-15}$	46	30	21	13,8	4,2	1,7	0,4

Notons que les valeurs du coefficient b' sont environ 3 fois supérieures à celles trouvées pour la rigidité initiale mais que la loi de variation est identique. Cette différence de 1 à 3 entre les valeurs de la rigidité et de la cohésion provient uniquement du type d'appareil utilisé pour les mesures et reste du même ordre de grandeur que les écarts que l'on peut avoir en mécanique des sols suivant que l'on utilise un rhéotest ou un scissomètre à cylindre plein.

3.3.2. Influence du pourcentage de sable

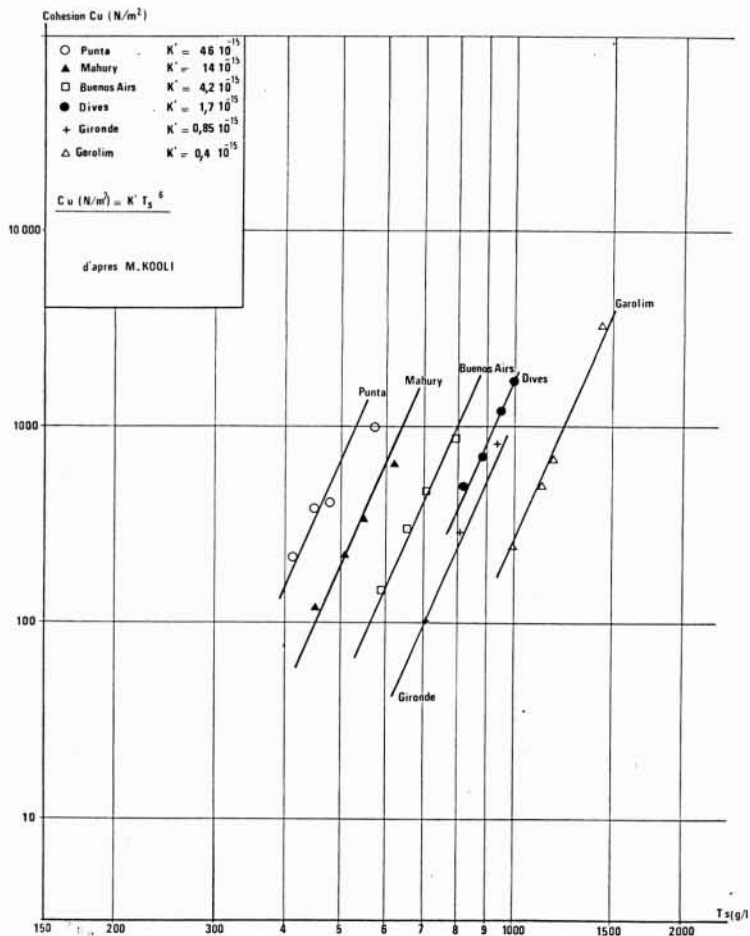
Les nombreuses mesures réalisées en introduisant différents pourcentages de sable fin (de 150 à 200μ) dans une suspension de vase, confirment que si la rigidité initiale diminue lorsque l'on raisonne en concentration globale (vase + sable) elle varie très peu si l'on raisonne en teneur en eau (ou en concentration) propre de la vase. En fait, entre 0 et 30 % de sable fin, la rigidité (ou la cohésion) d'une vase pure, de concentration donc de rigidité donnée, est peu affectée par la présence de sable. La vase agit comme un lubrifiant autour des particules de sable et seule la teneur en eau de la vase intervient dans la rigidité initiale des dépôts. Les études faites sur l'érosion des vases sableuses par les courants confirment cette hypothèse.

Au-delà de 30 % de sable dans la vase, les phénomènes sont modifiés, les particules sableuses pouvant être en contact direct les unes avec les autres apportent des perturbations appréciables dans la rigidité des dépôts.

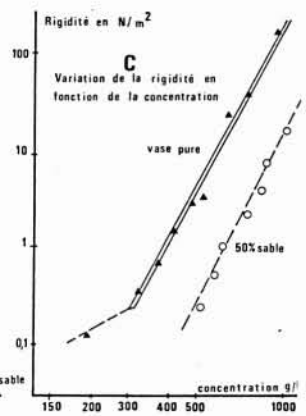
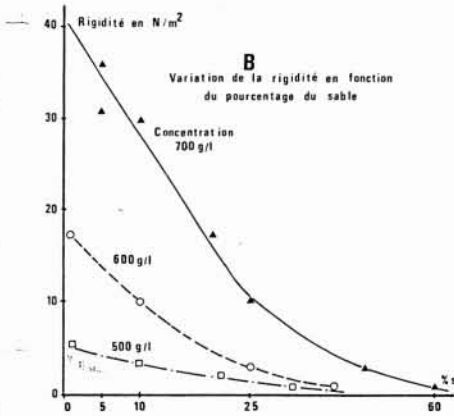
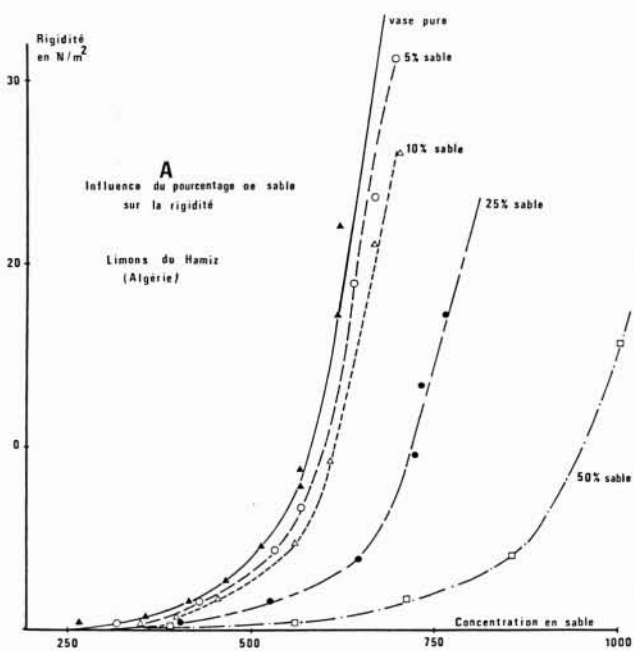
La figure 40 illustre cette influence du pourcentage de sable introduit dans des limons du Hamiz de différentes concentrations. On constate ce même phénomène aussi bien sur les vases des régions tempérées ayant une dominante d'illite dans les argiles (Gironde, Zeebrugge...) que sur les vases équatoriales à dominante de kaolinite. La rigidité initiale en fonction de la concentration globale des sédiments (vase + sable) diminue lorsque le pourcentage de sable augmente.

A titre d'exemple, on trouvera dans le tableau ci-après quelques valeurs de la rigidité initiale des vases de la Gironde (Ile Verte) en fonction du pourcentage de sable fin qu'elles contiennent.

RIGIDITE INITIALE EN N/m^2 POUR DIFFERENTES CONCENTRATIONS GLOBALES EN SÉDIMENTS SECS (Gironde)						
Teneur en sédiments secs (en g/l)	200	300	400	500	600	700
Pourcentage de sable 5 %	-	1,2	5	20	110	-
15 %	0,36	0,8	2,6	9,2	36	170
20 %	-	0,7	1,8	5,2	16	100
30 %	0,34	0,58	1,2	3,2	9	20



39. Cohésion non drainée en fonction de la concentration des vases de différentes origines.



40. Influence du pourcentage de sable sur la rigidité (vases du Hamiz, Algérie).

- A. Variation de la rigidité en fonction de la concentration globale (vase + sable).
- B. Variation de la rigidité en fonction du pourcentage en sable.
- C. Variation de la rigidité de vases pures et de vases sableuses (50 % de sable).

Il apparaît, pour cette vase de Gironde, que la diminution de la rigidité en fonction du pourcentage de sable est d'autant plus importante que la concentration en sédiment est forte. Par exemple, la rigidité varie dans un rapport de 12 pour une concentration globale de 600 g/l lorsque l'on passe de 5 à 30 % de sable et seulement de 2 pour une concentration de 300 g/l.

Pour une concentration déterminée la valeur du coefficient b diminuerait d'une façon linéaire entre 0 % et 20 % de sable dans la mixture ; au-delà de 20 % la décroissance serait plus lente.

Les mêmes constatations peuvent être faites sur des vases équatoriales ou de différents ports des régions tempérées et l'on retrouve toujours une réduction rapide du coefficient b lorsque l'on augmente le pourcentage de sable dans une mixture de vase de concentration globale (vase + sable) donnée. La figure 41 illustre ce résultat et le tableau ci-après donne quelques valeurs du coefficient b pour différentes vases et différents pourcentages de sable.

VALEUR DU COEFFICIENT b^6 DANS LA FORMULE $\tau/\dot{\gamma}$ ($N/m^2 = bTs^6$; (en 10^{-15})) VASES DE DIFFÉRENTES ORIGINES						
% sable	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Mahury	4,6	2,7	1,9	1,0	0,75	0,40
Dunkerque	3,5	2,8	2,0	1,05	0,5	-
Gironde	1,6	1,3	0,95	0,35	0,20	-
Escaut	1,1	-	-	-	0,15	-
Isère (Limons)	0,145	0,09	0,07	0,042	0,02	-

Si au lieu de raisonner en concentration globale en sédiment, c'est-à-dire en poids sec de sable et de vase par unité de volume, on examine la variation de la rigidité initiale en fonction de la concentration (ou de la teneur en eau) de la vase seule, on constate que la rigidité est peu modifiée par la présence de particules sableuses tant que celles-ci restent inférieures à 30 % du sédiment.

Cette influence du pourcentage du sable se retrouve sur la viscosité relative et sur la viscosité absolue avec une diminution de la viscosité lorsque le pourcentage de sable augmente si l'on raisonne en concentration globale (vase + sable).

La figure 42 et le tableau ci-après donnent, pour une vase de la Gironde provenant de l'Ile Verte, un exemple de la variation de la viscosité absolue en fonction de la concentration globale en sédiments et du pourcentage de sable contenu dans la mixture :

VISCOSITE ABSOLUE EN POISES POUR DIFFERENTS POURCENTAGES DE SABLE				
Concentration globale (en g/l)	Pourcentage en sable			
	5 %	15 %	20 %	30 %
250	8,5	5,5	4,5	2
300	13	8,5	6,5	2,8
400	55	20	13,5	5,5
500	90	50	35	11
600	-	130	70	23

En admettant une loi simplifiée de la variation de la viscosité absolue comme la sixième puissance de la concentration en particules solides :

$$\eta \text{ (poises)} = k Ts^6$$

on obtiendra les valeurs suivantes du coefficient k en fonction du pourcentage de sable contenu dans la mixture globale de sédiments.

VALEUR DU COEFFICIENT k EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SABLE (Gironde - Ile Verte)					
% de sable	0	5	15	20	30
$k/10^{-15}$	18	13	4,9	2,4	0,53

La même influence du pourcentage de sable dans les vases est mise en évidence par les mesures de cohésion non drainée comme on peut le remarquer pour les vases de la passe de By Goulée en Gironde. La cohésion des mixtures de vases et de sable, mesurée au scissomètre, diminue lorsque le pourcentage de sable augmente si l'on raisonne en concentration globale ; par contre, les cohésions sont peu différentes les unes des autres si l'on se base sur la concentration de la vase pure dans laquelle on rajoute du sable.

COHESION en N/m^2 POUR DIFFERENTES CONCENTRATIONS GLOBALES ET DIFFERENTS POURCENTAGES DE SABLE						
Concentration globale (sable + vase) (en g/l)	600	700	800	900	1000	1200
0 %	40	200	800	2800	8000	-
10 %	-	50	160	420	1000	5000
Pourcentage 16 % * de sable	20	90	250	800	2400	-
30 %	-	30	95	250	700	3500
40 %	-	18	55	150	350	1800

* Echantillon brut nature

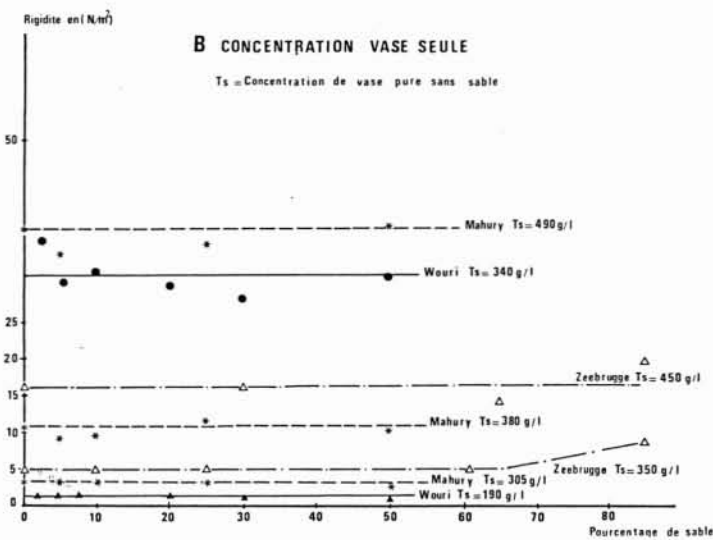
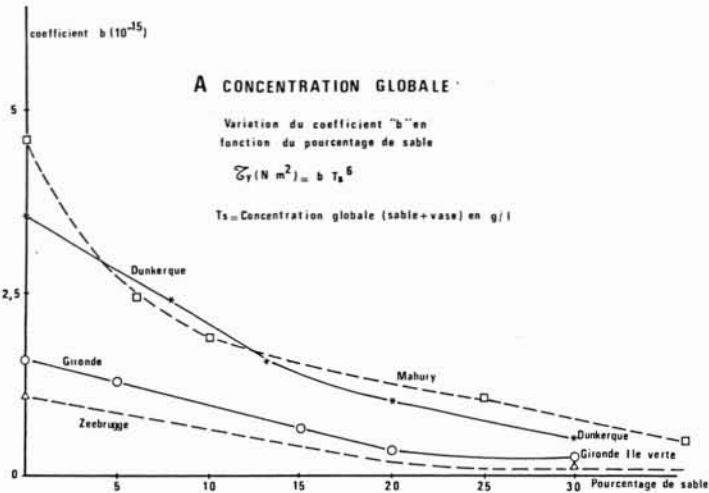
3.3.3. Influence de la salinité des eaux interstitielles

L'influence de la salinité des eaux sur la rigidité initiale de la vase n'est pas très importante et dépend en grande partie de la nature minéralogique des argiles contenues dans la vase.

Pour des vases équatoriales telles que celles du Mahury (Guyane), la salinité augmente légèrement la rigidité qui est en général 1,4 à 1,6 fois plus forte dans un milieu aqueux à 30 % de salinité qu'en eau douce. L'augmentation de la rigidité est d'autant plus sensible que la concentration en particules solides est plus faible.

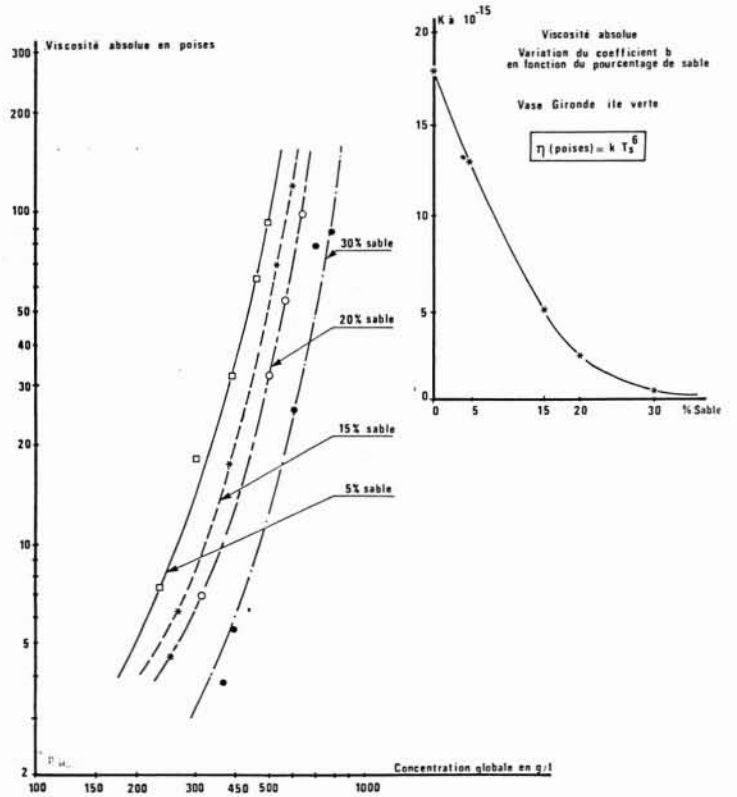
RIGIDITE INITIALE EN N/m^2 - VASE DU MAHURY						
Salinité en ‰	0	1	2,5	5	10	30
380	11	14	13,5	15	15	16
Concentration 300 (en g/l)	1,9	1,9	2,8	2,8	3,0	3,0
150	0,4	0,5	0,7	0,5	0,6	-
95	0,005	0,02	0,025	0,04	0,04	0,045

On retrouve la même tendance sur les vases du Wouri mais avec des écarts encore plus faibles que pour les vases de Guyane. Les écarts entre les rigidités en eau douce et celles en eau de mer étaient de 1,3.



41. Influence du pourcentage de sable sur le coefficient « b » de la rigidité.

- A. Concentration globale (vase + sable).
- B. Concentration de la vase seule.



42. Influence du pourcentage de sable sur la viscosité de la vase de Gironde (Ile Verte).

Pour les vases de la Gironde, on ne constate pas une influence appréciable de la salinité sur la rigidité pour les fortes concentrations et une très légère augmentation pour les faibles concentrations, sans que les valeurs n'affectent réellement les résultats.

Le même résultat est obtenu sur les vases de Dunkerque où l'influence de la salinité sur la rigidité est négligeable même lorsque l'on passe de l'eau distillée à l'eau de mer à 30‰.

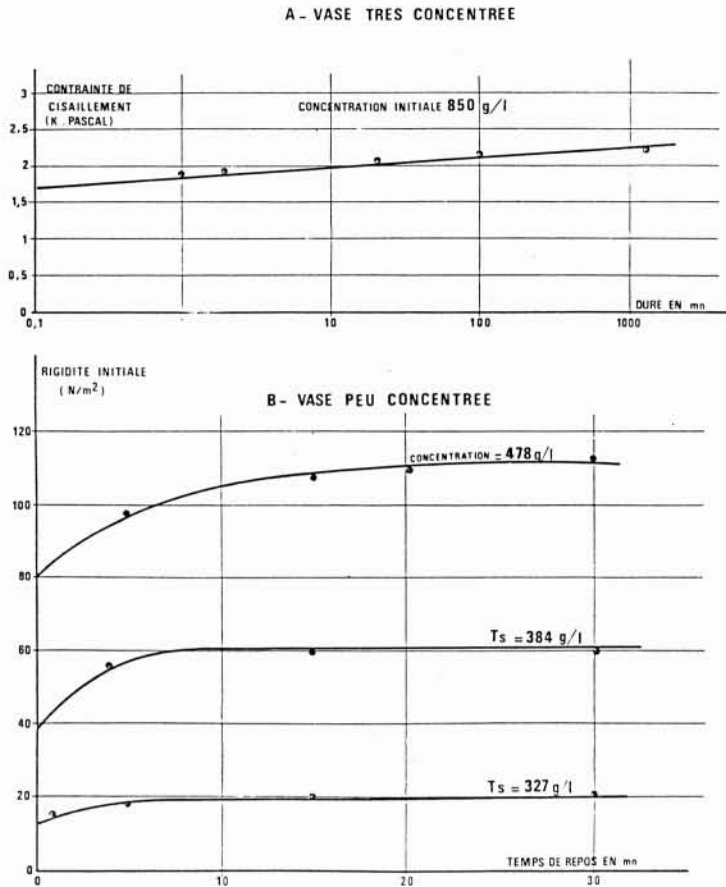
Pour la cohésion on constate, comme pour la rigidité, que la salinité a peu d'influence, les valeurs étant pratiquement confondues pour les vases de la Gironde à 0,8‰ et à 30‰ de salinité.

L'influence de la salinité sur la viscosité est plus sensible que sur la rigidité ou la cohésion. D'une façon générale, la viscosité absolue est plus forte lorsque les eaux interstitielles sont constituées d'eau de mer. Sur les

vases de la Gironde alors que rigidité et cohésion n'étaient pratiquement pas affectées par la qualité des eaux, on trouve pour la viscosité des valeurs 5 à 10 fois supérieures en eau de mer qu'en eau distillée. Entre des salinités de 8 et 30‰, la viscosité varie dans un rapport de 2 à 2,5.

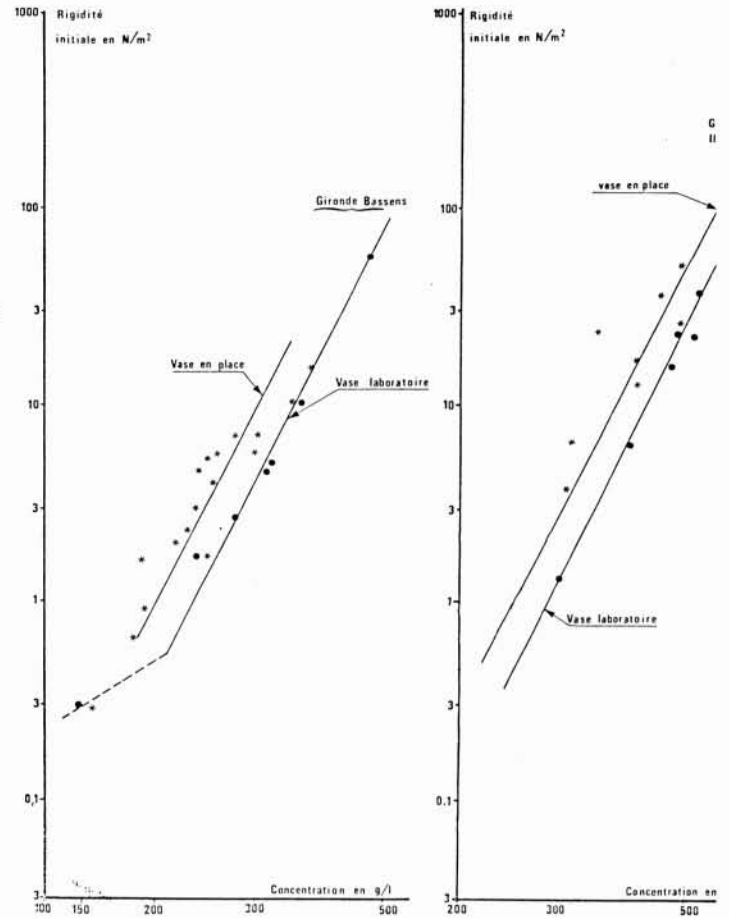
Pour les vases du Mahury, riches en kaolinite, on retrouve la même tendance, la viscosité absolue étant deux fois plus forte en eau de mer à 30‰ qu'en eau douce à 0‰.

On peut conclure en disant que la salinité des eaux affecte peu la cohésion et la rigidité d'une vase, l'influence étant d'autant plus faible que la concentration des dépôts est élevée. Pour la viscosité, les valeurs seront 2 à 3 fois plus fortes en eau de mer qu'en eau douce, ce rapport pouvant atteindre 5 lorsque l'on compare les viscosités en eau de mer et en eau distillée.



43. Variation de la cohésion et de la rigidité en fonction du temps de repos (vase de Gironde).

- A. Vase très concentrée (Ts = 850 g/l).
- B. Vase moyennement concentrée (Ts = 327 à 478 g/l).



44. Comparaison entre les rigidités mesurées en place et en laboratoire (vases de Gironde, de Bassens et de l'Ile Verte).

3.3.4. Influence du remaniement des vases

Sous une action mécanique, certains fluides thixotropiques peuvent voir leurs propriétés mécaniques se transformer, passant d'un état plastique à un état liquide. Cette transformation se caractérise par une diminution appréciable de leur cohésion ou de leur rigidité. La mixture se « fluidifie » sous l'effet de l'agitation bien que sa concentration en particules solides reste constante.

Au contraire, cette même mixture pourra se « solidifier » après un temps de repos plus ou moins long avec augmentation, pour une même concentration en sédiments secs, de sa cohésion ou de sa rigidité.

Les mixtures de vases répondent, pour certaines gammes de concentration en particules solides, à cette loi et présentent des rigidités ou cohésions plus faibles en milieu remanié qu'après un temps de repos prolongé,

d'où l'intérêt d'essayer de mesurer les propriétés rhéologiques de ces vases directement in situ ou après des temps de repos assez longs.

Cette modification des caractères rhéologiques en fonction du remaniement des vases peut être mise en évidence lorsque l'on trace un rhéogramme complet en vitesses croissantes puis décroissantes.

L'influence de la modification de la rigidité d'une vase sous l'action d'un remaniement peut également être évaluée en réalisant une mesure de rigidité dans la vase de concentration donnée qui s'est tassée naturellement en milieu calme et en faisant la même mesure après avoir brassé énergiquement le dépôt. On constate dans la plupart des cas une réduction de 2 à 3 de la rigidité.

De même, on peut examiner comment une vase fraîchement brassée se reconsolide en fonction du temps de repos. La figure 43 donne, pour des vases de la Gironde (Ile Verte) les variations de la rigidité initiale et

de la cohésion en fonction du temps de repos et de la concentration des mixtures.

Sur des vases très concentrées (850 g/l), la contrainte de cisaillement augmente progressivement suivant une loi logarithmique en fonction du temps passant de 1 500 N/m² après brassage à 2 500 N/m² après une vingtaine d'heures.

Temps de repos (en mn)	0	1	2	20	100	1250
Contrainte de cisaillement (en Pascal)	1500	1800	1900	2050	2350	2500

Sur des vases peu concentrées — telles que celles que l'on trouve déposées dans les estuaires — on retrouve l'augmentation de la rigidité initiale en fonction du temps mais l'asymptote est obtenue après un temps d'autant plus court que la concentration de la vase est plus faible. Pour une vase de 478 g/l de concentration, la rigidité passe de 80 N/m² après brassage à 110 N/m² après 20 min de repos et reste constante au-delà ; pour une vase de 327 g/l, la rigidité passera de 12 N/m² après brassage à 20 N/m² 5 min après et conservera cette valeur tout le temps (sauf si un tassement se produit).

Cette influence de la thixotropie ou de la réduction des rigidités et des cohésions en fonction du remaniement des vases se retrouve lorsque l'on compare les mesures faites en laboratoire, sur des vases remaniées, et les mesures faites directement in situ à l'aide de la sonde rhéologique SR10 du L.C.H.F., les concentrations en particules solides étant évaluées sur place à l'aide de la sonde à rétrodiffusion JTD3 mise au point au L.C.H.F. et la SAPRA pour le compte des Phares et Balises [22].

Que ce soit dans l'estuaire de la Loire, dans celui de la Gironde ou dans le port de Dunkerque, on constate que les valeurs mesurées directement en nature sont 2 à 3 fois supérieures à celles que l'on a pu mesurer en laboratoire sur des vases remaniées (fig. 44).

En mécanique des sols des mesures faites sur des vases du Havre très concentrées, ont montré la même évolution des cohésions non drainées en fonction du temps de repos [19]. La cohésion passe en 2 mois environ de repos de 170 N/m² après malaxage à 250 N/m² pour une vase de 950 g/l de concentration (teneur en eau de 65 %) et de 60 N/m² à 220 N/m² pour une vase de 610 g/l (121 % de teneur en eau). La croissance de la cohésion suit une loi logarithmique en fonction du temps de repos, l'asymptote étant obtenue après 1 ou 2 mois suivant la concentration.

3.3.5. Influence des matières organiques

L'influence de l'oxydation des matières organiques contenues dans une vase n'a été étudiée que sur des sédiments de l'Isère contenant 5 % de matières organiques (débris végétaux), 25 % de carbonates, 25 % d'illite et 45 % de poudres de quartz et de feldspath.

Après quelques jours d'exposition à l'air, ces vases devenaient noires et nauséabondes par suite de la décomposition des matières organiques. Des mesures de rigidité faites sur ces vases oxydées font apparaître

systématiquement une augmentation de la rigidité dans un rapport de 2 à 3 par rapport à des vases fraîchement prélevées.

3.3.6. Influence de la température

Pour les faibles concentrations, les mesures réalisées entre 4° et 50° montrent que la viscosité d'une suspension de vase diminue en suivant une loi assez comparable à celle de l'eau, les valeurs pouvant être 2 fois plus fortes dans des eaux très froides que dans des eaux à 30 ou 40°.

Pour les fortes concentrations, les phénomènes sont plus difficiles à étudier et si l'on constate dans certains cas une augmentation de la viscosité et de la rigidité lorsque la température augmente, il semble que le facteur temps ait une influence notable et qu'en moyenne la température a peu d'influence sur la rigidité initiale dans les limites de température rencontrées en nature (0 à 30 °C) mais augmente les rigidités et les viscosités pour des températures élevées comme celles rencontrées pour les boues de forage. Dans ce dernier cas, certaines boues peuvent s'écouler très facilement à 20° et sont complètement solides à 80° [21].

3.3.7. Influence du temps de tassement sur la rigidité

En associant les variations de concentration des dépôts en fonction du temps et de la rigidité initiale en fonction de la concentration, on peut avoir une idée de la rigidité d'un dépôt de vase de diamètre donné après un temps de tassement déterminé.

On a vu au paragraphe 2.3.1, relatif à l'influence de la dimension des particules sur le tassement des mixtures, que la concentration moyenne des dépôts, exprimée en g/l, pouvait être estimée en fonction du diamètre d en microns par l'expression :

— après 6 mois de tassement : T_s (en g/l) = 300 + 80 d

— après 10 jours de tassement : T_s (en g/l) = 200 + 75 d

— après 10 h de tassement : T_s (en g/l) = 150 + 50 d .

Par ailleurs il a été montré au paragraphe 3.3.1 que l'on pouvait avoir un ordre de grandeur de la rigidité initiale d'une suspension de concentration T_s , constituée de particules de diamètre d en microns par l'équation :

$$\tau_y \text{ (N/m}^2\text{)} = 5 \cdot 10^{-15} T_s^6 / d^2$$

En combinant tassement et rigidité on obtient les valeurs suivantes de la rigidité τ_y (en N/m²) en fonction du diamètre d (en microns) des particules et du temps de tassement t .

Diamètre en microns	0,5	1	2,5	5	10
Après 10 heures	0,57	0,3	0,34	0,82	3,75
Après 10 jours	3,5	2,16	2,7	7,2	36
Après 6 mois	30	15	15,6	23,5	88

Pour des vases argileuses de différentes origines, dont le diamètre moyen est compris entre 0,5 et 2,5 μ , un

ordre de grandeur peut être donné pour les rigidités des vases superficielles en admettant que :

$$\tau_y \text{ (N/m}^2\text{)} = 0,85 t^{0,62} \quad (t \text{ en jours})$$

Pour une vase déposée au cours d'une étale de marée et s'étant tassée pendant 2,5 h, la rigidité initiale moyenne atteindrait 0,20 à 0,25 N/m², elle serait donc facilement reprise par les courants. Cette rigidité passerait à 0,85 N/m² après 1 jour de tassement et à 3 N/m² après 7 jours correspondant à une période de marées de mortes eaux. Après 3 mois de tassement la rigidité atteindrait 14 N/m² correspondant à une vase difficilement remise en suspension par les courants.

4. Intérêt des connaissances sur le tassement et la rhéologie des vases en vue d'évaluer leur comportement sous les actions hydrodynamiques

L'étude du comportement des mixtures de sédiments très fins, telles que les vases, les boues ou les limons, sous les actions hydrodynamiques nécessite une estimation aussi précise que possible de leur état de tassement et de leurs caractéristiques rhéologiques.

La seule connaissance des caractéristiques granulométriques et minéralogiques de ces matériaux est insuffisante pour apprécier leur consistance et évaluer les forces nécessaires pour les mettre en mouvement que ce soit sous une action mécanique, telle que le déplacement d'une vanne immergée dans la vase ou le passage d'un bateau partiellement enfoncé dans un dépôt de vase, ou sous une action hydraulique telle que celles des courants ou de la houle. Par ailleurs, il est intéressant de définir, avec une précision suffisante, la tenue d'un massif de vase émergé ou immergé et la pente d'équilibre sous les seuls effets gravitaires.

En appliquant les lois de variations des concentrations des dépôts au cours des temps et les lois de rigidité, cohésion et viscosité pour différents états de tassement, il est possible d'aborder dans de bonnes conditions l'étude du comportement des vases sous une action hydrodynamique tant en nature qu'en modèle réduit.

Qu'il s'agisse de la pente d'équilibre d'un talus de vases, d'un courant de turbidité, de la vitesse critique d'érosion d'un dépôt de sédiments fins, du débit solide des vases en fonction de la vitesse des courants, de l'action des houles sur les fonds ou des actions cumulées des houles et des courants sur des dépôts en cours de consolidation, la connaissance de l'état de tassement et surtout de leur rigidité initiale est indispensable pour établir des lois empiriques ou théoriques.

Il en est de même lorsque l'on veut représenter en modèle réduit physique des phénomènes d'envasement où l'on est obligé d'appliquer les lois de similitude aux variations de la concentration en fonction du temps et surtout aux propriétés rhéologiques des dépôts.

On se reportera aux différentes publications du L.C.H.F. sur ces problèmes et nous rappellerons simplement dans cette conclusion quelques lois essentielles en actualisant les coefficients à l'aide des nouvelles valeurs de la rigidité adoptées depuis le début de l'année 1987 [4-5-23-24-27-28].

4.1. Pentes d'équilibre des vases sous l'eau et hors d'eau

A concentration en sédiments secs égale, la pente d'équilibre d'un talus de sédiments fins cohésifs est d'autant plus forte que le sédiment est plus fin. Il existe donc une infinité de courbes donnant la pente d'équilibre en fonction de la concentration des vases. A titre d'exemple, une vase de 1,5 μm de diamètre aura une pente d'équilibre de 6 % pour une concentration de 320 g/l alors qu'une vase de 4 μm de diamètre aura la même pente d'équilibre pour une concentration de 600 g/l.

En associant la pente d'équilibre à la rigidité initiale τ_y du dépôt on obtient des lois générales indépendantes de la nature des sédiments de la forme :

$$\text{tg } \alpha = k \tau_y \quad (\tau_y > 3 \text{ N/m}^2)$$

avec $k = 0,01$ pour les vases immergées et $k' = 0,003$ pour les vases émergées.

Les influences du pourcentage de sable contenu dans les dépôts de vase et de la nature du milieu aqueux se retrouvent dans les pentes d'équilibre suivant les mêmes lois que celles mises en évidence pour la rigidité qui reste le paramètre le plus représentatif pour caractériser les pentes en eau calme d'un talus de vase.

4.2. Courants de turbidité, coulées boueuses, glissement

Le passage des courants de turbidité, qui peuvent se propager dans les fonds à très grandes distances comme un fluide lourd, aux coulées boueuses se fait pour des concentrations assez variables des suspensions mais reste fixé autour d'une même valeur de la rigidité initiale comprise aux environs de 10 N/m². A partir de 75 à 100 N/m² les coulées boueuses font place à des éboulements en vase avec formation de blocs ne se diluant pratiquement plus.

4.3. Action des courants uniformes sur des fonds de vases. Vitesses critiques d'entraînement. Débits solides en fonction de la rigidité initiale

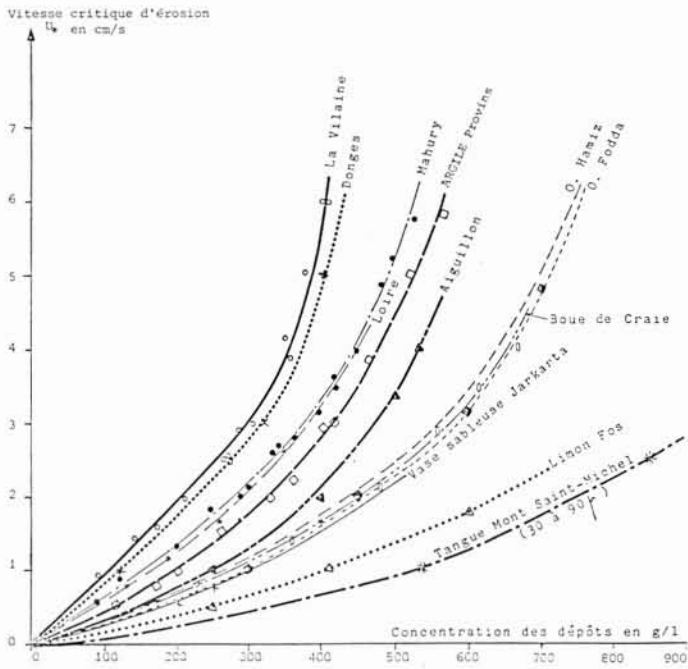
Soumis à l'action de courants uniformes des dépôts de vase pourront être érodés si la force tractrice exercée par l'eau sur les fonds dépasse un certain seuil critique fonction des caractéristiques mécaniques des dépôts et, notamment de leur viscosité et de leur rigidité initiale.

La vitesse critique d'érosion dépendra de la nature minéralogique et granulométrique des sédiments ainsi que de celle des eaux interstitielles. Chaque vase a donc une courbe de vitesse critique d'érosion en fonction de la concentration des particules solides qui lui est propre (fig. 45).

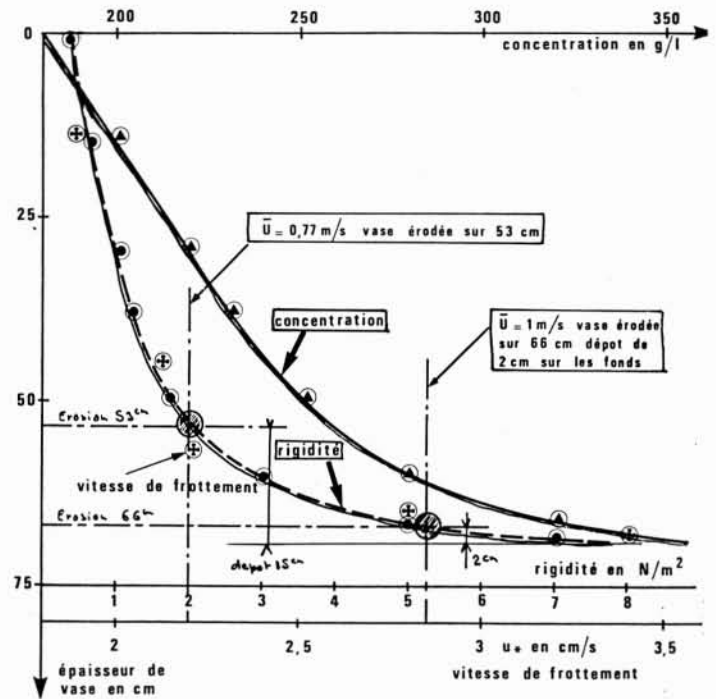
Par contre, si l'on étudie la vitesse critique d'érosion de différentes vases en fonction de leur rigidité initiale, on constate que les points se placent dans une même droite répondant aux équations suivantes :

$$\begin{aligned} & \text{— si } \tau_y \leq 3 \text{ N/m}^2 \quad u^* c \text{ (en m/s)} = 0,013 \tau_y^{1/4} \\ & \text{— si } \tau_y \geq 3 \text{ N/m}^2 \quad u^* c \text{ (en m/s)} = 0,009 \tau_y^{1/2}. \end{aligned}$$

Le débit solide de vases fluides ou plastiques remises en suspension par un courant d'eau claire exerçant sur



45. Vitesses critiques d'érosion des différentes vases en fonction de leur concentration.



46. Condition d'érosion par les courants d'un dépôt de vase présentant un gradient de concentration.

les fonds une force tractrice τ_0 peut être donné par une expression de la forme :

$$Q_s \text{ (g m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)} = k(\tau_0 - \tau_c)^{3/2}$$

k étant égal à 330 pour les vases de la Loire, 180 pour des boues de craie, 160 pour les vases équatoriales du Wouri...

La force tractrice τ_c étant une fonction de la rigidité initiale τ_y , la connaissance des propriétés rhéologiques des dépôts de vases permet d'évaluer les volumes remis en suspension et transportés sous l'action d'un courant.

Il semble que d'une façon générale le débit solide varie comme une fonction inverse de la rigidité :

$$Q_s = f(u_*)/\tau_y$$

Pour des vases très concentrées, ayant atteint une rigidité supérieure à 75 N/m², les conditions de remise en suspension et de transport des vases ne suivent plus les mêmes lois. Les dépôts se comportent comme un solide résistant à de très fortes vitesses. Si l'on atteint le seuil critique d'érosion, les dépôts ne sont plus remis en suspension mais sont arrachés sous forme de copeaux ou de blocs qui seront transportés par charriage et donneront naissance aux galets de vases que l'on rencontre dans les torrents.

4.4. Erosion et transport des vases dans les estuaires

Sous l'action des courants de marées les vases estuariennes seront érodées, transportées et déposées en fonction de la vitesse des courants agissant sur les fonds et les suspensions.

D'une façon générale les vases seront remises en suspension par des coefficients de marée supérieurs à 80, pour lesquels les vitesses dépassent 0,80 m/s et auront tendance à se déposer aux marées de mortes eaux dès que les vitesses tomberont en dessous de 0,50 m/s.

Aux étales de courant les dépôts pourront se consolider pendant quelques heures alors que pendant la période de mortes eaux, la consolidation pourra se poursuivre sur plusieurs jours entraînant des gradients de concentration plus importants dans les dépôts.

La connaissance du gradient de concentration dans les dépôts, donc du gradient de rigidité, est un élément primordial pour définir les conditions de remise en suspension des dépôts. Chaque couche sédimentaire réagira en effet différemment suivant sa rigidité ou sa cohésion. Il sera possible à partir de la répartition de ces rigidités en fonction de la profondeur et des équations précédentes donnant le débit solide en fonction de la rigidité d'un dépôt d'en déduire l'épaisseur des vases qui pourrait être « piégée » dans un chenal d'estuaire, dragué à une profondeur supérieure à celle de son état d'équilibre sous l'action des courants de marée (fig. 46).

4.5. Action des houles et des clapots sur les dépôts de vase plus ou moins consolidés

Les études faites au L.C.H.F., tant en nature qu'en modèle, ont montré depuis de très nombreuses années que le déplacement des vases sous la houle dépendait de la rigidité initiale et de la viscosité des vases déposées sur les fonds [4].

Suivant les caractéristiques rhéologiques des dépôts, et de leur gradient en fonction de la profondeur, des mouvements orbitaux de la houle pourront se propager dans les vases fluides ou plastiques les « fluidifiant » par suite des effets de thixotropie et facilitant ainsi leur remise en suspension ou leur transport en masse sous l'action des courants qui se développent dans le fluide.

Ici encore la connaissance des conditions de tassement et de consolidation rhéologique des dépôts est un élément de la plus haute importance pour aborder les problèmes d'action de la houle sur les fonds de sédiments très fins.

4.6. Mesures en nature

De très gros progrès ont été réalisés au cours des dernières années pour mesurer directement en nature (ou sur modèle réduit) les caractéristiques des vases en place.

Les densités des vases en place peuvent être estimées grâce à des sondes gammadensimétriques à rétrodiffusion du type J.T.D.3 mises au point par le C.E.A. (S.A.R.) et le L.C.H.F. à des sondes rhéologiques S.R.10 mises au point par le L.C.H.F. pour le compte des Phares et Balises et du S.T.C. De même, le Port autonome de Bordeaux a pu mettre au point une sonde à ultra-sons susceptible d'évaluer en continu les concentrations des vases.

En laboratoire une sonde de microdensité par ultra-sons, avec mesure de la puissance émise pour obtenir une valeur constante à la réception après atténuation du signal a été mise au point par le L.C.H.F. et permet de mesurer des concentrations en continu entre 50 et 700 g/l avec une précision de 2 % sur une épaisseur du sol de 6 mm permettant une auscultation très fine des dépôts. De même, des turbidimètres différentiels, Sogreah-L.C.H.F., permettent d'évaluer en continu les concentrations en particules dans les eaux dans des gammes allant de quelques milligrammes par litre à 5 à 10 g/l.

En utilisant ce matériel, de très nombreuses mesures ont pu être faites en nature pour les ports autonomes français (Bordeaux, Dunkerque, Nantes, Saint-Nazaire...) ainsi que pour différents services de l'Etat ou privés permettant d'acquérir une meilleure connaissance des propriétés physiques des sédiments cohésifs.

Toutes ces mesures ont apporté la preuve qu'il était possible avec ce matériel et les connaissances obtenues en laboratoire sur les lois de tassement et de rigidité, de prévoir les conditions de consolidation des vases dans les estuaires, les zones portuaires, les barrages, les champs d'épandage des boues et d'une façon générale dans tous les secteurs où les vases, limons ou boues peuvent être rencontrés.

A partir de ces mesures en nature, il a été possible d'apporter des précisions sur les qualités exactes des

sédiments remaniés, de prévoir les risques d'envasement, d'évaluer les profondeurs dans un chenal navigable en éliminant les dépôts superficiels de vases fluides, d'enregistrer le rendement des dragages d'entretien, de fixer les conditions d'évacuation des vases d'un barrage et définir les possibilités de transport et de mise en dépôt dans des champs d'épandage ou de rejet en mer de suspensions de boues plus ou moins concentrées.

Des économies très substantielles ont déjà pu être obtenues grâce à la connaissance in situ des conditions de consolidation rhéologique des vases, les dragages du port autonome de Nantes-Saint-Nazaire ayant pu être réduit de 20 % ainsi que ceux du port de Bordeaux et des espoirs étant permis pour l'amélioration de la méthodologie de la mise en dépôt des boues de craie provenant du creusement du tunnel sous la Manche. Pour les barrages des résultats très valables avaient déjà été obtenus à partir des connaissances sur les propriétés physiques des dépôts pour dévaser des retenues entièrement colmatées et assurer le transport des sédiments jusqu'à la mer par le seul jeu des courants de chasse ; le dévasement du barrage du Hamiz en Algérie en est un exemple ainsi que les études faites pour l'E.D.F. sur les barrages de la Haute-Loire.

Conclusions

En conclusion de cette synthèse sur le tassement et la rhéologie des vases, on peut dire que si le comportement des sédiments très fins du type vases, limons ou boues, est très complexe par suite des variations de leurs propriétés physiques au cours du temps et sous les actions extérieures, il est maintenant possible d'avoir de bonnes présomptions sur leurs conditions de consolidation et, de ce fait sur leur comportement sous les actions hydrodynamiques.

Dans un domaine où les dépôts sont à l'interface entre un fluide dense et un sol rigide, c'est-à-dire entre les domaines de l'hydraulique et de la mécanique des sols, les recherches poursuivies depuis de nombreuses années par le Laboratoire central d'hydraulique de France apportent les connaissances indispensables à la compréhension des suspensions plastiques.

Dans cette synthèse, on trouvera l'ensemble des principaux résultats obtenus dans ce domaine et une actualisation des valeurs numériques permettant d'aborder correctement les problèmes de tassement et de consolidations rhéologiques des dépôts.

L'appareillage mis au point pour les mesures en nature apporte un complément utile pour préciser les caractéristiques des dépôts de sédiments très fins à différentes profondeurs et suivre leur variation dans l'espace et le temps. Les applications qui ont été faites pour les ports autonomes, pour les sociétés privées ou l'Administration apportent la preuve de l'intérêt de cette méthodologie et des progrès que l'on peut en escompter pour mieux connaître les phénomènes d'envasement, adopter des techniques appropriées pour les réduire, mieux utiliser les produits de dragages et, d'une façon générale, diminuer les effets néfastes des phénomènes d'envasement dans les chenaux des ports maritimes, les barrages et les champs d'épandage.

Bibliographie

par ordre d'utilisation dans le texte

Nota : Cette liste reprend, pour la commodité du lecteur, l'ensemble des références citées dans la première partie.

- [1] *Etude des sédiments péltiques. Propriétés physico-chimiques* — C. MIGNIOT — LCHF-FDES — Janvier 1962.
- [2] *Techniques classiques d'analyses en sédimentologie* — J. LORIN — LCHF — Juillet 1975.
- [3] *Etude des vases de la Gironde — Rapport de synthèse* — C. MIGNIOT — LCHF-PAB — Mars 1985.
- [4] Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous les conditions hydrodynamiques — C. MIGNIOT — *La Houille Blanche*, n° 7 — 1968.
- [5] *Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne* — C. MIGNIOT — Doctorat d'Etat Orsay — Octobre 1982.
- [6] Utilisation des jauges nucléaires de densité pour étudier et mesurer en laboratoire et in situ la concentration des dépôts de vases — G. MEYER, A. CAILLOT et C. MIGNIOT — *Colloque int. sur l'Hydrologie isotopique* — AIEA — Septembre 1983.
- [7] Etude sur les mouvements des sédiments péltiques dans les modèles d'estuaire — J. LARRAS et C. MIGNIOT — *Annales des Ponts et Chaussées* — LCHF — Décembre 1970.
- [8] *Etude rhéologique des vases de Zeebrugge* — Rapport LCHF-CEA — Novembre 1978.
- [9] *Barrage antitempête sur l'Escaut — Caractéristique mécanique des vases* — M. BEN ABDALLAH — LCHF — Août 1980.
- [10] *Influence des actions hydrodynamiques sur les vases d'Indonésie* — S. PRADATO — Thèse Doctorat — Orsay — 1984.
- [11] *Estuaire du Mahury — Etude des propriétés physiques des sédiments* — C. MIGNIOT et B. BELLESSERT — LCHF — Juin 1967.
- [12] *Etude des caractéristiques physico-chimiques des remblais du Marais Perdu* — C. MIGNIOT — LCHF — Novembre 1967.
- [13] *Contribution à l'étude des phénomènes d'électrodécantation* — S. MANOUJIAN — Thèse Doctorat Orsay — Octobre 1980.
- [14] Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les sédiments fins — P. KELLER et J. P. BOUCHARD — *Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF*, n° 1 — 1986.
- [15] *Caractéristiques des viscosimètres à cylindres coaxiaux* — J. VALEMBOIS — Note LCHF — Décembre 1965.
- [16] *More solution to sticky problems* — BROOKFIELD Engineering Laboratories Inc. USA.
- [17] *Mise au point concernant la théorie et la pratique du viscosimètre coaxial* — Note int. LCHF — F. RICHE — Février 1978.
- [18] *Etude du cisaillement des vases à l'aide du viscosimètre coaxial et du scissomètre* — Rapport de fin d'étude de l'Ecole Centrale — M. KOOLI — LCHF Juin — 1981.
- [19] *Nouvel appareil de cisaillement circulaire pour argiles très peu denses in situ* — I. GOUTTIÈRE — Thèse Doctorat Ecole Centrale Paris — Avril 1987.
- [20] *Contribution à l'étude des lois du comportement des vases* — Kh. SALMAN — Thèse Doctorat Ecole Centrale — Décembre 1985.
- [21] La rhéologie des suspensions — Application aux boues de forage — R. METROT — *Revue IFP*, Vol. VI — 1951.
- [22] Mesures des caractéristiques mécaniques des vases déposées dans les chenaux de navigation — C. MIGNIOT — *SHF, XVIII^e Journées de l'hydraulique* — Marseille, Septembre 1984.
- [23] *Action des courants et des houles sur les fonds de vase* — C. MIGNIOT — Cours de formation continue Ecole Nationale des Ponts et Chaussées — Février 1977.
- [24] *Synthèse des connaissances sur le tassement et la rhéologie des vases* — C. MIGNIOT — Service Technique Central de la DPVN-LCHF — Janvier 1987.
- [25] Les matières en suspension dans les estuaires — C. MIGNIOT — *Comité Français de Géologie de l'Ingénieur* — Bulletin n° 28 — Octobre 1983.
- [26] Rejet des produits de dragage à l'aval d'un barrage sur l'oued Hamiz — J. VALEMBOIS et C. MIGNIOT — *La Houille Blanche*, n° 2 et 3 — 1975.
- [27] *Exposé sur les problèmes d'envasement étudiés par le LCHF* — C. MIGNIOT — LCHF Note Int. 1984.
- [28] Dynamique sédimentaire estuarienne — C. MIGNIOT — *Institut océanographique — Oceanis*. Vol. 6 — Fascicules 1980/81.

Adresse de l'auteur : Monsieur C. Migniot, 4, avenue Jean-Jaurès, 94220 Charenton-le-Pont (France) Tél. : 43 68 81 17.

