

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
POUR L'EXPLOITATION DE LA MER

CNEXO-COB
CONTRAT N°79/6074



ETUDE DU DEBIT SOLIDE DES VASES


RAPPORT GENERAL

par C. ESCURIER
su. la dir. de C. MIGNIOT

IFREMER-DERO/EL



0EL01118



B710
ESC-E

LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE

10 rue Eugène Renault - 94 700 MAISONS - ALFORT

NOVEMBRE 1984

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION
DE LA MER

I F R E M E R

-.-.-.-

C N E X O - C O B

CONTRAT N° 79/6074

-.-.-.-

ÉTUDE DU DÉBIT SOLIDE DES VASES

-.-.-.-

RAPPORT GÉNÉRAL

S O M M A I R E

-.-.-.-

	Pages
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - PROPRIETES PHYSIQUES DES VASES.....	3
1.1. Généralités.....	3
1.2. Les vases utilisées pour les études.....	5
CHAPITRE 2 - ETUDE DU COMPORTEMENT DES VASES SOUS L'ACTION DE COURANTS UNIDIRECTIONNELS.....	7
2.1. Conditions expérimentales.....	7
2.2. Début d'érosion des fonds vaseux.....	10
2.3. Débits solides de vase.....	12
CHAPITRE 3 - COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR LA VASE FINE DE LA LOIRE AVEC LES RESULTATS OBTENUS SUR UNE VASE SABLEUSE D'INDONESIE ET LES RECHERCHES EFFECTUEES DANS D'AUTRES LABORATOIRES.....	17
3.1. Etude du débit solide des vases sableuses de Jakarta.....	17
3.2. Comparaison avec les résultats d'autres laboratoires.....	23
CONCLUSIONS.....	29

* * *

*

INTRODUCTION

-.-.-.-

Parmi les problèmes posés sur la dynamique des vases, celui des masses transportées par un courant en fonction des forces tractrices exercées par le fluide sur les fonds apparaît comme primordial.

En 1980, date d'établissement du contrat* entre le CNEXO/COB et le LCHF relatif à l'étude théorique du débit solide des vases, on ne savait pas encore si le débit solide transporté variait linéairement avec la vitesse ou comme le carré ou le cube de cette dernière. Les nombreuses recherches qui avaient été faites, en particulier par le LCHF, dans ce domaine, fournissaient des éléments sur les conditions de remise en suspension des vases fluides, plastiques ou solides à leurs différents états de consolidation (réf. 1 et 2) mais les volumes déplacés en suspension sous l'action d'un courant uniforme n'avaient été abordés par le LCHF que d'une façon théorique (réf. 3) en partant des caractéristiques rhéologiques des vases et des contraintes exercées par le fluide sur les fonds.

Dans le domaine du comportement des vases sous l'action des courants alternatifs des recherches avaient été faites par le LCHF dès 1962 en examinant les mouvements des sédiments très fins du type limons et vases dans les estuaires soumis à la marée (réf. 4 et 5) et en effectuant de nombreuses mesures en nature (réf. 6 et 7) mais aucune loi mathématique précise n'avait pu être proposée compte tenu de la complexité des problèmes et des difficultés financières rencontrées pour effectuer des recherches théoriques et expérimentales sur un problème cependant d'intérêt général.

Afin d'apporter une première contribution à ces recherches le CNEXO/COB a décidé en fin 1979 d'attribuer au LCHF un léger crédit permettant de réaliser quelques recherches sur les masses de vase susceptibles d'être transportées par un courant s'écoulant sur des dépôts de sédiments très fins de concentrations et rigidités connues.

*

Contrat n° 79/6074 signé par le LCHF le 8 Février 1980 pour un montant de 100 000 F TTC.

Le LCHF, pour sa part, devait réaliser l'investissement de base, c'est-à-dire la construction d'un canal de grande dimension (30 m de longueur) dans lequel des courants uniformes et alternatifs pourraient être réalisés permettant ultérieurement de poursuivre les recherches avec des moyens très perfectionnés. Ce canal, financé par le LCHF, est maintenant opérationnel dans son Annexe de Bordeaux-Mérignac.

Dans le cadre des crédits du marché CNEXO/COB il n'était évidemment pas possible de résoudre entièrement le problème complexe du transport des vases mais de mettre au point une méthodologie des mesures et d'apporter des premiers résultats permettant d'avoir déjà une vue d'ensemble sur le débit solide des sédiments très fins en suspension en fonction des contraintes de cisaillement exercées par le fluide sur les fonds. Pour apporter le maximum d'informations, les mesures réalisées au LCHF sur des vases provenant principalement de l'estuaire de la Loire ont été complétées par des recherches faites sous la direction du LCHF à l'occasion d'un doctorat préparé par Monsieur PRADOTO sur des vases sableuses provenant de l'Indonésie (réf. 8), ce qui explique la durée nécessaire pour réaliser ces études qui dépassaient largement le contrat initial.

Dans ce rapport, après avoir rappelé dans la première partie les propriétés physiques des vases expérimentées, nous indiquerons dans la deuxième partie les résultats des recherches proprement dites portant sur l'étude des débits solides des vases fines, provenant de l'estuaire de la Loire, sous l'action des courants unidirectionnels. Dans une troisième partie une comparaison avec les résultats obtenus sur des vases sableuses provenant de la région de Jakarta sera faite, ainsi qu'avec les recherches récentes effectuées par d'autres laboratoires, apportant ainsi des éléments pour poursuivre ultérieurement les recherches avec des moyens beaucoup plus puissants que l'intérêt et la complexité du problème justifieraient pleinement.

* * *

*

CHAPITRE 1

-.-.-.-

PROPRIETES PHYSIQUES DES VASES

1.1. GENERALITES

1.11. Composition minéralogique

Sous le terme *Vase* on désigne les mélanges de particules solides très fines (diamètre inférieur à 40 μm) et d'eau associés éventuellement à une faible partie de sable fin et de matières organiques.

Les constituants les plus importants sont des minéraux argileux comme : Kaolinite, Montmorillonite, Illite, Chlorite, etc., qui se présentent sous forme de particules de formes très diverses (bâtonnets, lamelles hexagonales,...) de dimensions comprises entre quelques microns et 0,1 micron (*réf. 2*).

1.12. Caractéristiques générales des suspensions de vase

Les propriétés plastiques et cohésives des vases sont dues aux particules très fines ($D < 2 \mu\text{m}$) qui ont une surface spécifique suffisante pour que les forces de surface physico-chimiques soient significatives et même supérieures aux forces de pesanteur (*réf. 9*).

Selon les caractéristiques minéralogiques de la vase et de l'eau, les forces interparticulaires de surface peuvent être répulsives (d'énormes concentrations de vase peuvent être maintenues en suspension) ou attractives (les particules se collent et forment ainsi des agglomérats de taille suffisante pour que les forces de pesanteur redeviennent dominantes : il y a floculation et la vase se dépose).

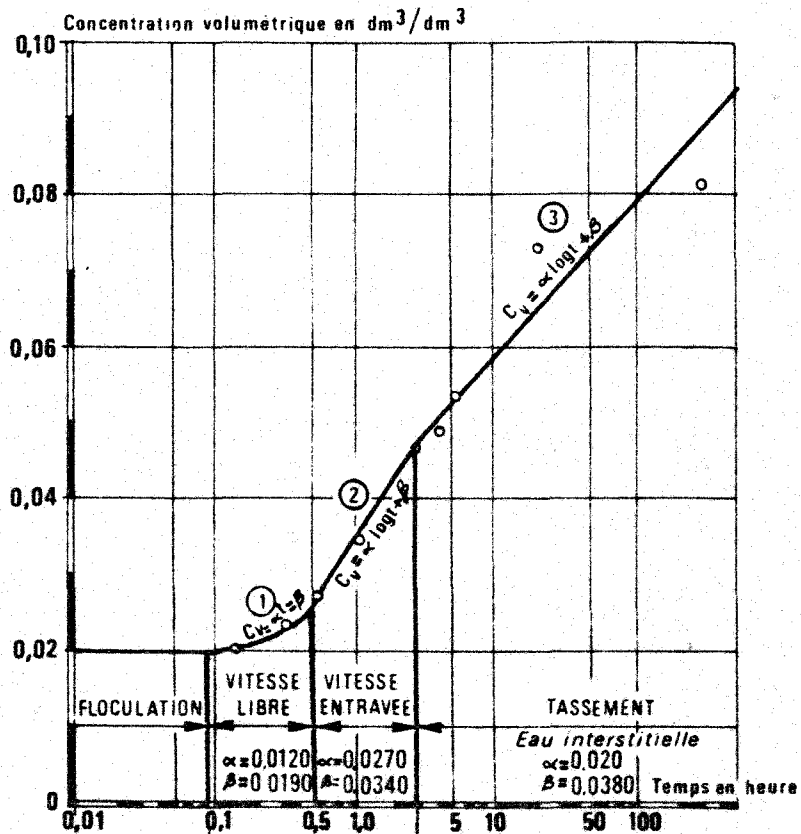
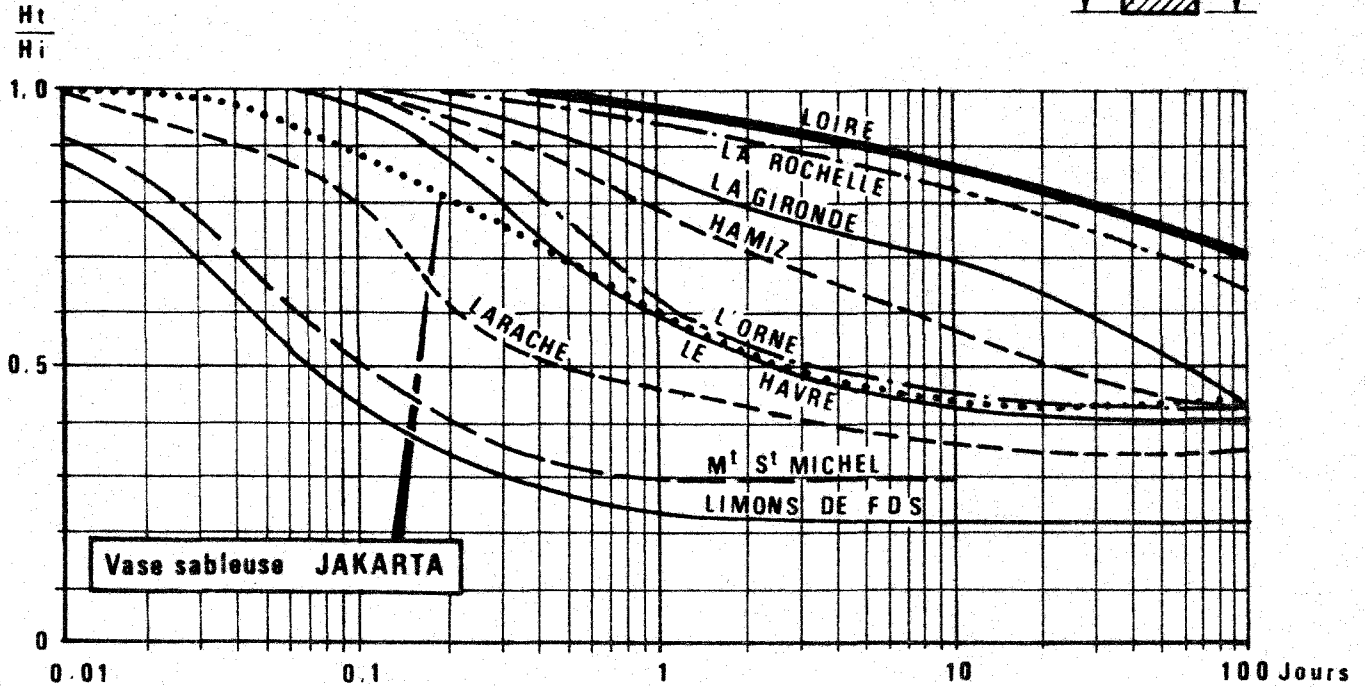
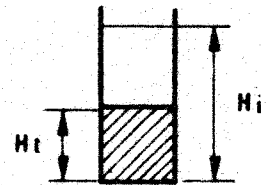
1.13. Propriétés physiques des vases

1.131. Vitesse de chute

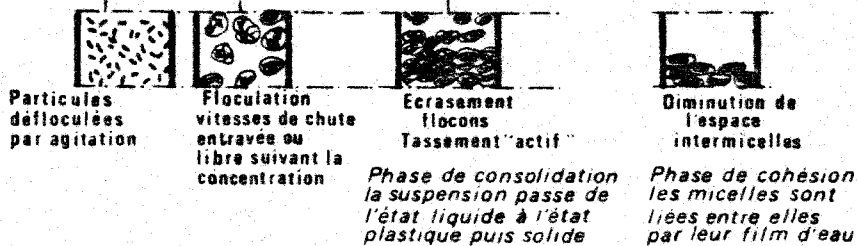
Selon l'état de la suspension de vase en particules élémentaires ou en flocons, la vitesse de chute peut être multipliée par un facteur de

TASSEMENT DES VASES

CONCENTRATION INITIALE 200 g/l . HAUTEUR INITIALE : 1 m)



REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS DOMAINES DU TASSEMENT DE LA VASE



1 000 à 10 000 de $0,1 \mu\text{m/s}$ pour une particule élémentaire à 1 mm/s pour un flocon de vase.

1.132. Tassement des sédiments pélimitiques

Après s'être déposés par gravité sur le fond, les flocons de vase s'écrasent sous leur propre poids et perdent progressivement une partie de leur eau interstitielle (*figure 1*).

Au cours du tassement, la vase présente des états physiques très différents suivant la teneur en eau (liquides visqueux ou solides). La concentration moyenne du dépôt varie comme le logarithme du temps (*réf. 2*).

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

En nature, du fait des rythmes de sédimentations et d'actions mécaniques extérieures irrégulières, on observe souvent des couches sédimentaires alternées dont les comportements pourraient être différents de ceux d'une couche homogène de même densité moyenne.

1.133. Propriétés rhéologiques des vases

Les vases ont des propriétés rhéologiques très différentes suivant leur état de tassement ou leur concentration (*réf. 2 et 10*).

Pour les faibles concentrations, les suspensions de vase se comportent comme des fluides Newtoniens (contrainte de cisaillement τ proportionnelle à la vitesse de cisaillement $\frac{du}{dy}$)

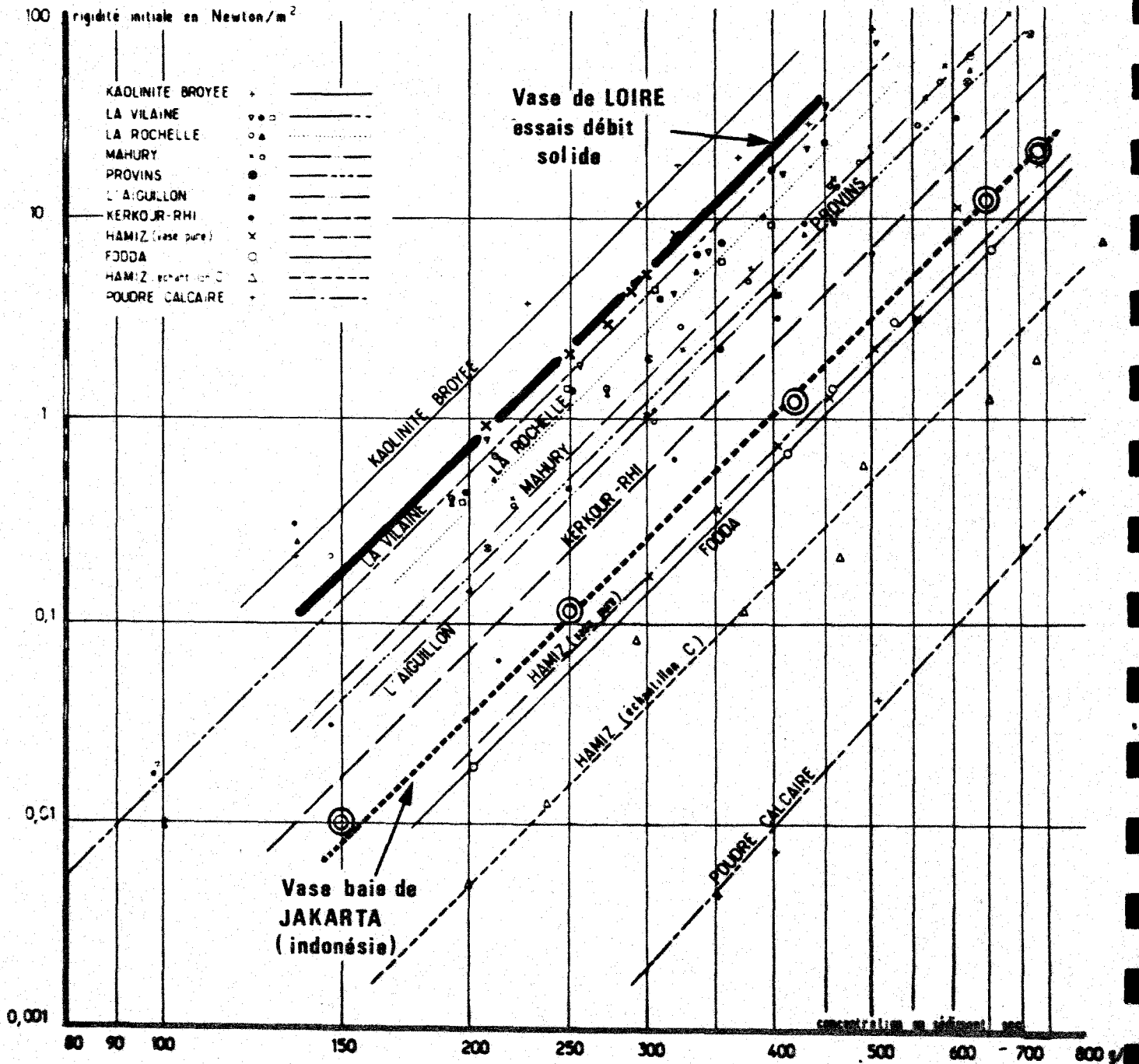
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

où μ est le coefficient de viscosité dynamique.

Pour des fortes concentrations une contrainte minimale est nécessaire pour mettre le fluide en mouvement.

Au-delà de ce seuil, le comportement de la vase peut être linéaire :

VARIATION DE LA RIGIDITE INITIALE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION



$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$$

Modèle de Bingham

ou parabolique :

$$\tau = \tau_0 + \sqrt{K \frac{du}{dy}}$$

Modèle de Casson

Les dépôts de vase consolidée (concentrations supérieures à 250 g/l) peuvent présenter des phénomènes de thixotropie (diminution de la rigidité et de la viscosité sous une action mécanique extérieure).

Chaque type de vase a une courbe rhéologique qui lui est propre, la rigidité initiale étant, à concentrations égales, d'autant plus importante que le sédiment est plus fin (*figure 2*).

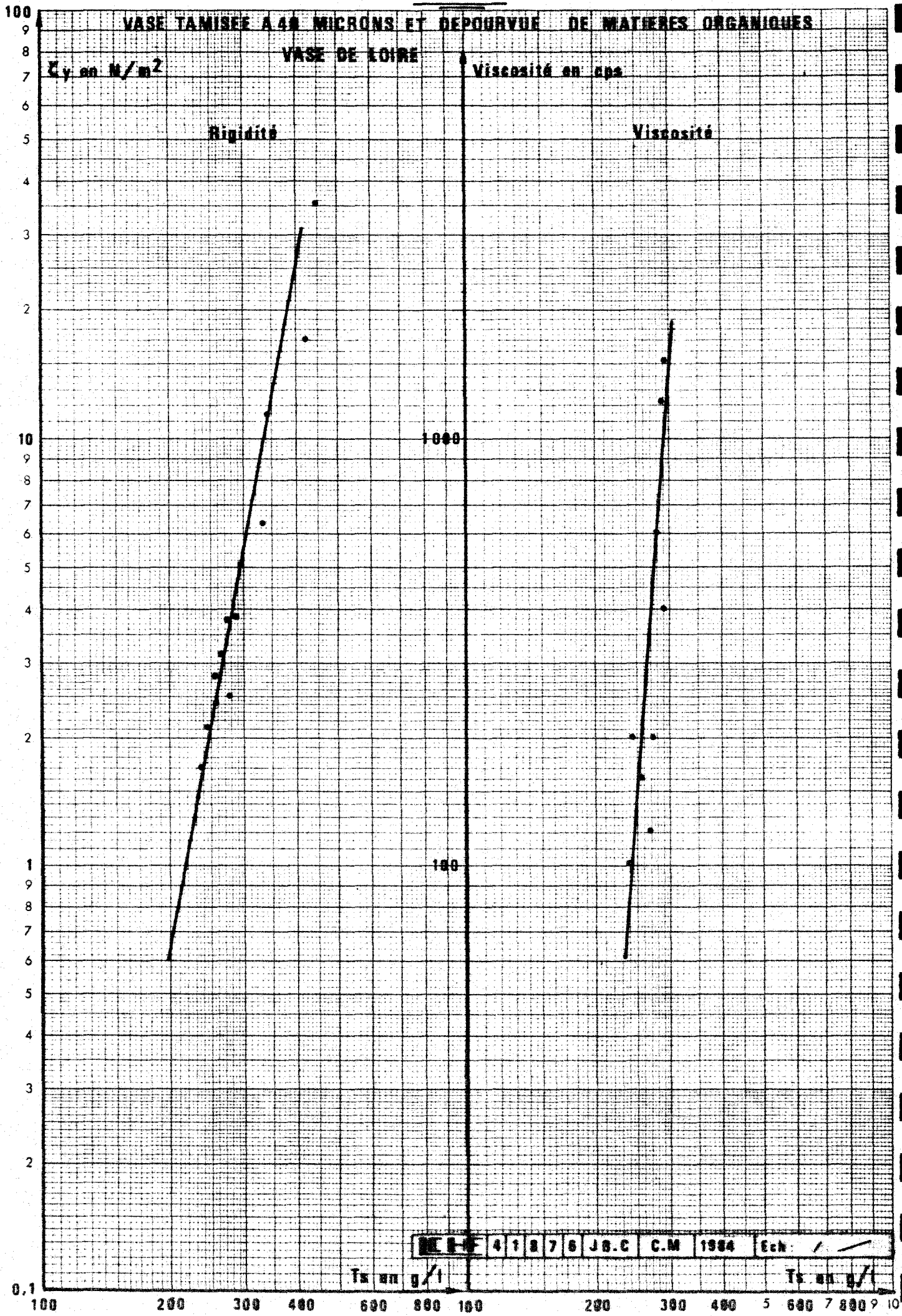
1.2. LES VASES UTILISEES POUR LES ETUDES

Deux types de vases ont été utilisés pour évaluer le débit solide en fonction de l'état de tassement des dépôts et de la vitesse du courant : une vase pure provenant de l'estuaire de la Loire (essais effectués au LCHF), une vase sableuse provenant de la baie de Jakarta en Indonésie (essais de Monsieur PRADOTO).

1.21. La vase de la Loire

La vase de l'estuaire de la Loire, utilisée pour les études, était une vase tamisée à 40 microns et traitée pour éliminer les matières organiques.

RIGIDITE INITIALE ET VISCOSITE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN SEDIMENT



Cette vase a un diamètre moyen de 1,5 micron et contient 20 % environ de Carbonates, des particules très fines de Quartz et de Feldspaths, ainsi qu'une fraction importante d'Argile (plus de 60 %) avec une répartition assez voisine de l'Illite (dominante), de la Kaolinite et de la Montmorillonite, les Chlorites étant en faible quantité.

Sur la *figure 3* les valeurs de la rigidité initiale et de la viscosité de cette vase sont indiquées en fonction de la concentration en sédiments secs. En comparant ces valeurs de la rigidité avec celles mesurées sur d'autres vases on constate que la vase de Loire utilisée a une rigidité initiale importante (*figure 2*). Ce fait est dû au fort pourcentage d'éléments très fins argileux contenus dans le sédiment utilisé.

1.22. La vase de Jakarta (Indonésie)

La vase utilisée par Monsieur PRADOTO pour ces études provenait de la région de Jakarta en Indonésie.

Ce matériau contient 50 % de sable très fin compris entre 40 et 150 microns, et 50 % d'éléments inférieurs à 40 microns. La fraction inférieure à 2 microns (limite granulométrique des Argiles) est d'environ 25 %. La fraction argileuse est constituée principalement de Smectite (56 %), la Kaolinite et la Chlorite représentant 38 % et l'Illite seulement 6 %.

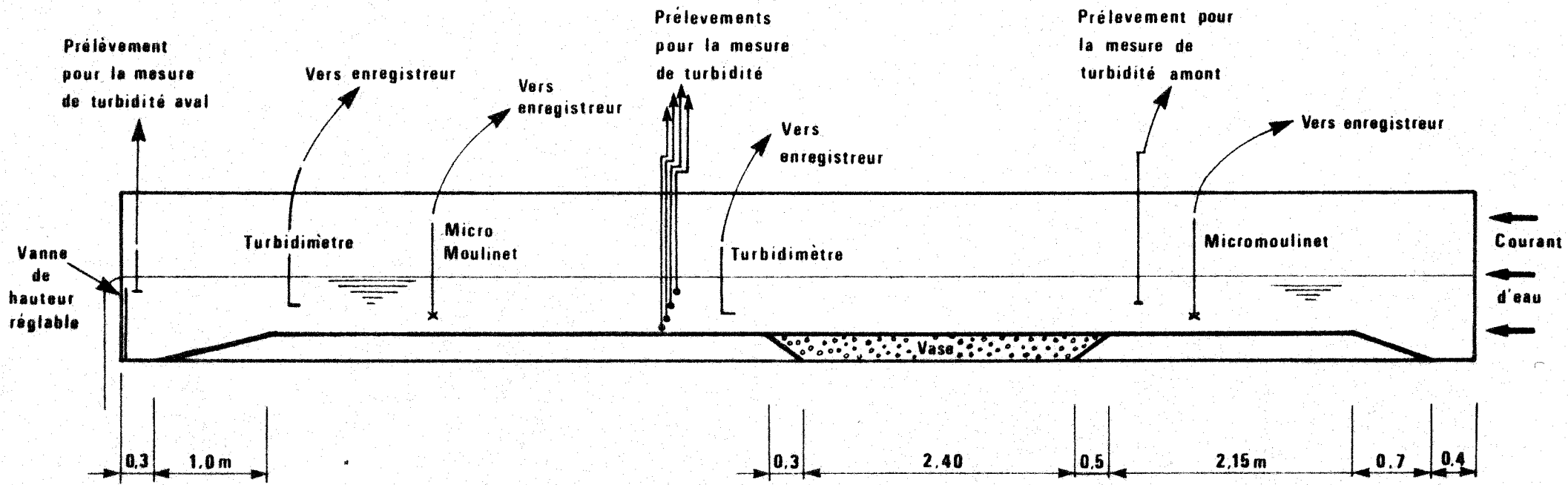
La rigidité initiale de la vase de Jakarta se rapproche de celle des limons par suite de la présence des éléments sableux. Cette rigidité est, à concentrations égales, 15 à 20 fois plus faible que celle mesurée sur la vase de Loire expérimentée (*figure 2*).

* *

*

CANAL DE SEDIMENTOLOGIE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

(LARGEUR CANAL = 0,40 m)



RECH 4 1 9 7 7 J.F.A C.M 1984 Ech: 1/50 1/20

plan 1/50
Echelle :
hauteur 1/20

CHAPITRE 2

ETUDE DU COMPORTEMENT DES VASES
SOUS L'ACTION DE COURANTS UNIDIRECTIONNELS

(Vase du type estuaire de la Loire)

2.1. CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.11. Le canal d'essais (figure 4)

Les essais ont été réalisés dans un canal inclinable à parois vitrées dont les caractéristiques sont les suivantes :

longueur	12 m
largeur	0,4 m
hauteur	0,6 m

L'alimentation est faite à l'amont par l'intermédiaire d'une cuve de mise en charge, reliée au canal par un tuyau flexible de gros diamètre, le débit du groupe motopompe desservant cette cuve étant réglable. Le canal comporte, à l'aval, une vanne manoeuvrée manuellement permettant de faire varier la cote d'eau.

La vase était disposée dans la partie médiane du canal sur une épaisseur de 10 cm et une longueur de 3 m.

2.12. Déroulement des essais

Chaque essai correspond à une vase de concentration donc de rigidité initiale donnée .

La vase est mise en place au fond du canal en début d'essai sur une épaisseur de 10 cm et une surface de $0,4 \times 3$ m.

La concentration de la vase -supposée homogène- est mesurée et la vitesse du courant augmentée progressivement jusqu'à l'observation du début d'érosion, puis par paliers.

Pour chaque palier le débit solide en suspension et les diverses caractéristiques de l'écoulement sont mesurés.

L'essai est arrêté lorsque la quantité de vase restant dans la fosse est insuffisante.

NOTA : Il s'agit d'un dispositif en circuit ouvert où la vase n'est pas recyclée (en première approximation).

2.13. Les mesures

Durant chaque essai -pour une vase de concentration donnée- nous avons effectué les mesures suivantes :

a) *Enregistrements en continu*

- Vitesses à l'amont et à l'aval de la fosse et à différentes profondeurs au-dessus des fonds.
- Turbidités en aval de la fosse et devant le déversoir.

b) *Des prélèvements ont été effectués à intervalles réguliers afin de déterminer par colorimétrie la turbidité de l'eau*

- à l'amont de la fosse,
- en aval de la fosse à quatre profondeurs différentes (2 cm - 5 cm - 9 cm et 15 cm au-dessus du fond),
- devant le déversoir où la turbidité de l'eau est presque homogène sur toute la hauteur.

c) *Pour chaque palier de variation du débit du groupe motopompe d'alimentation les valeurs suivantes étaient notées :*

- Débit liquide (par la mesure de la hauteur d'eau sur un déversoir triangulaire situé sous le canal).
- Hauteur d'eau à l'amont et à l'aval du canal.
- Durée de l'essai.

d) De nombreuses photographies ont été prises lors de ces essais en particulier au début d'érosion du lit de vase.

e) A la fin de l'essai la quantité totale de vase érodée est estimée.

2.14. Présentation des résultats

Les résultats sont présentés en donnant soit les vitesses critiques de frottement sur le fond u_* , nécessaires pour provoquer le début d'érosion des vases, en fonction de la concentration des dépôts ou de leur rigidité initiale, soit le débit solide par unité de surface des fonds affouillables en fonction de la vitesse de frottement u_* .

Les calculs de la vitesse de frottement sur le fond u_* ont été estimés de façon classique par la formule :

$$\frac{\bar{U}(z)}{u_*} = \frac{1}{K} \text{Log} \frac{y U_*}{\nu} + 5,5$$

où $\bar{U}(z)$ est la vitesse de l'écoulement à la distance y du fond
 K est la constante de VON KARMAN
 ν est la viscosité cinématique de l'eau

Or cette loi n'est valable que pour les couches limites en équilibre d'un écoulement turbulent de liquide Newtoniens et des études récentes (réf. 11) ont montré que les valeurs de U_* étaient surestimées de 20 à 40 % en conservant cette hypothèse de profil de vitesse logarithmique lorsque le liquide au-dessus du fond est un mélange d'eau et de vase, c'est-à-dire n'est plus rigoureusement un fluide Newtonien. Afin de conserver une homogénéité dans les essais réalisés au LCHF (et par manque de moyens pour mesurer correctement la tension de cisaillement sur le fond ou u_*) nous avons conservé l'hypothèse de profil de vitesse logarithmique tout en sachant que nos valeurs de U_* seront surestimées.

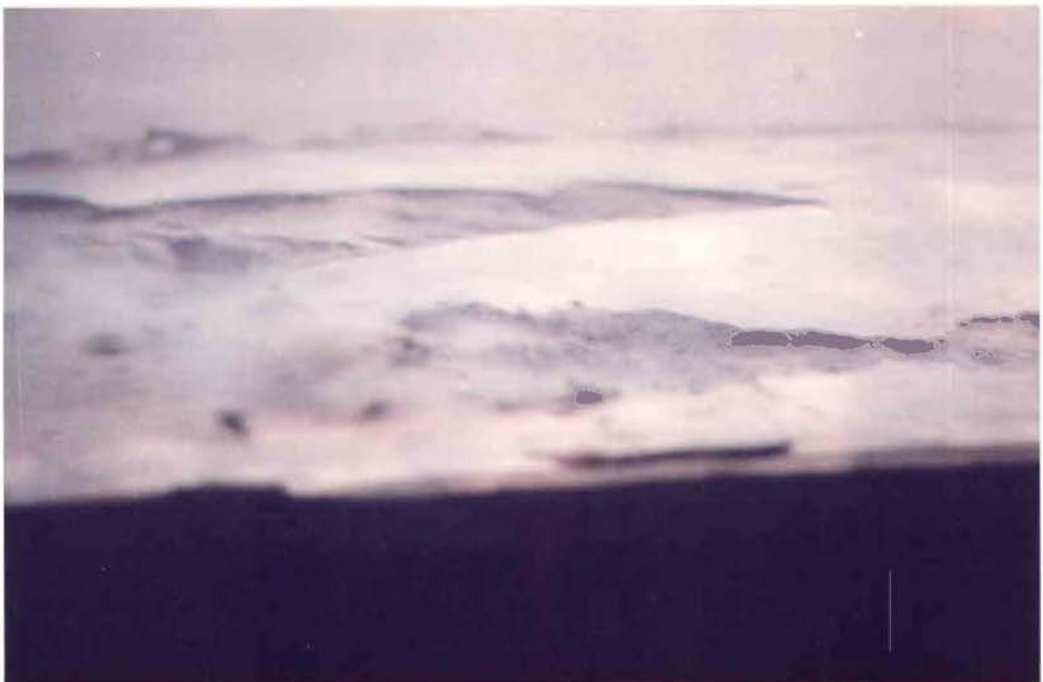
Dans le canal vitré on constate que sur fond dur le rapport entre la vitesse moyenne \bar{U} et la vitesse de frottement u_* est égal à 24 pour une hauteur d'eau de 0,30 à 0,35 m.

5

DEBUT D'EROSION



155 299 - Vase peu concentrée



155 330 - Vase très concentrée

2.2. DEBUT D'EROSION DES FONDS VASEUX

2.21. Description

L'érosion des fonds peut se présenter avec des aspects totalement différents selon l'état de consolidation des vases :

- pour les faibles concentrations on observe une érosion "de surface" : les particules de vase sont entraînées en suspension en formant une couche très turbide au-dessus du fond,
- pour des fortes concentrations, on observe une érosion "en masse" : la vase est arrachée par copeaux qui se diluent d'autant moins facilement que la vase est plus concentrée. L'érosion prend naissance sur une irrégularité du fond (particule de sable, puits de drainage,...) et s'étend rapidement de l'amont vers l'aval en formant un sillon de plus en plus profond et évasé.

Les photos de la figure 5 illustrent ces deux types d'érosion (n° 155 299 et 155 330).

2.22. Mécanisme du début d'érosion (réf. 2 et 9)

Dans l'état actuel des recherches sur ce sujet il semble que la force de cisaillement sur le fond -locale- soit le meilleur paramètre de début d'érosion des vases, bien qu'il eût été plus logique de considérer le système de forces internes du sol vaseux (système très complexe dépendant de la nature et de la concentration de la vase, de la composition de l'eau et de sa température).

S'il n'y a pas de forces extérieures tangentielles (courant nul), le système est en équilibre. Dès que l'on applique une force extérieure (force de cisaillement due au courant par exemple) sur la frontière de cette vase supposée non totalement rigide, il y a déformation, donc mouvement des particules et réajustement du système des forces internes.

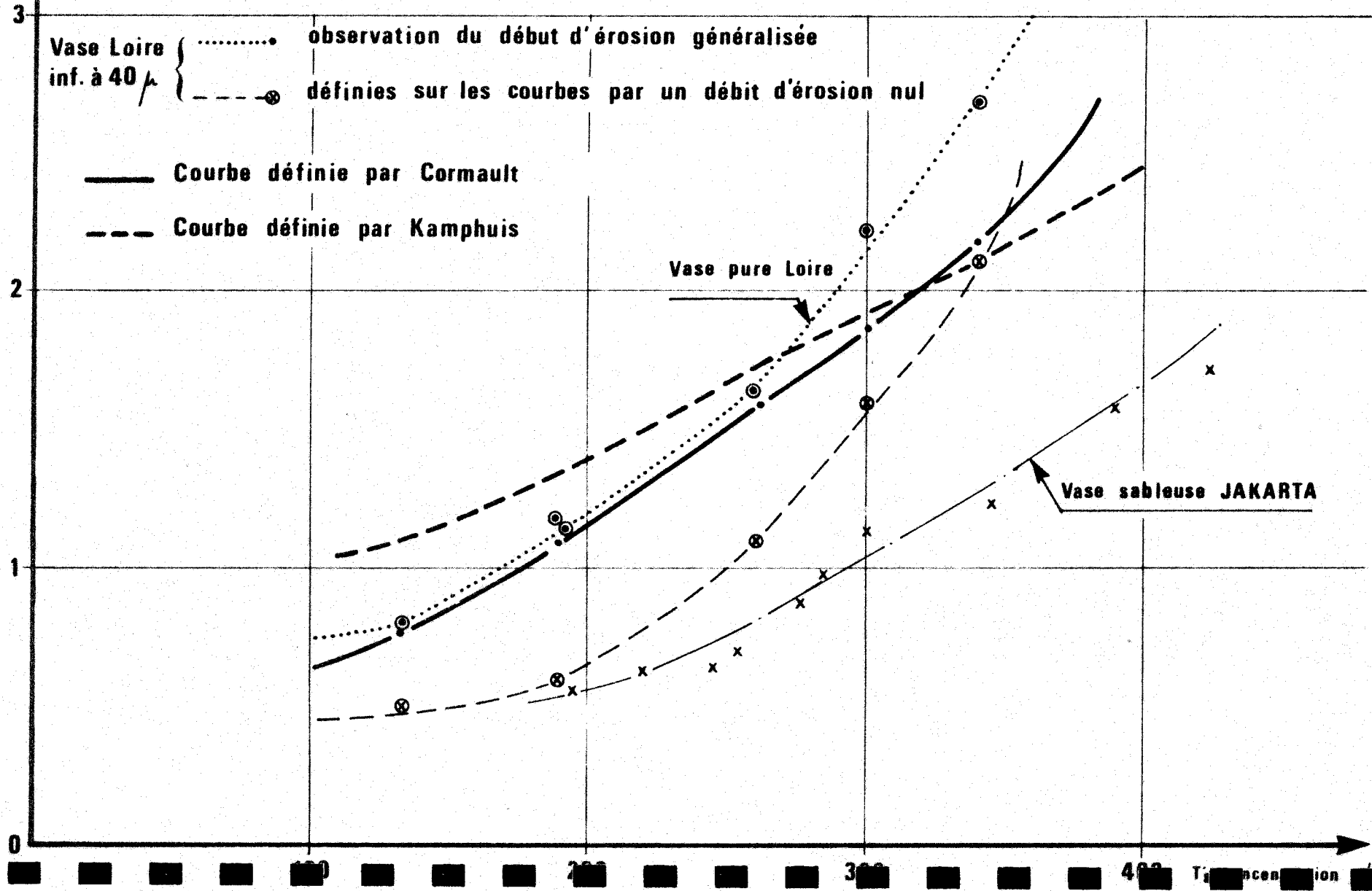
Si les liens interparticulaires sont brisés, la particule (ou le copeau) est arrachée par le courant : il y a érosion.

2.23. Résultats des essais

Sur la figure n° 6 nous avons porté les vitesses de frottement critiques sur le fond déterminées sur la vase de la Loire tamisée à 40 microns par deux méthodes :

u * Critique
cm/s

VITESSE DE FROTTEMENT CRITIQUE D'EROSION



REC-11879 J.F.A C.M 1984 Ech: /

- observation lors des essais du début d'érosion généralisée du lit de vase,
- extrapolation des courbes de débit solide en fonction de la vitesse de frottement sur le fond jusqu'aux valeurs correspondant à un débit nul (les valeurs sont très faibles).

Les valeurs données par d'autres auteurs, CORMAULT (réf. 11) et KAMPHUIS (réf. 13) ont été portées sur le même croquis, ainsi que les résultats trouvés sur les vases sableuses de Jakarta (Indonésie).

La formule donnée par P. CORMAULT :

$$U_{*cr} = 0,0055 Ts + 0,0000026 Ts^2$$

U_* vitesse de frottement sur le fond en m/s

Ts concentration de la vase en g/l

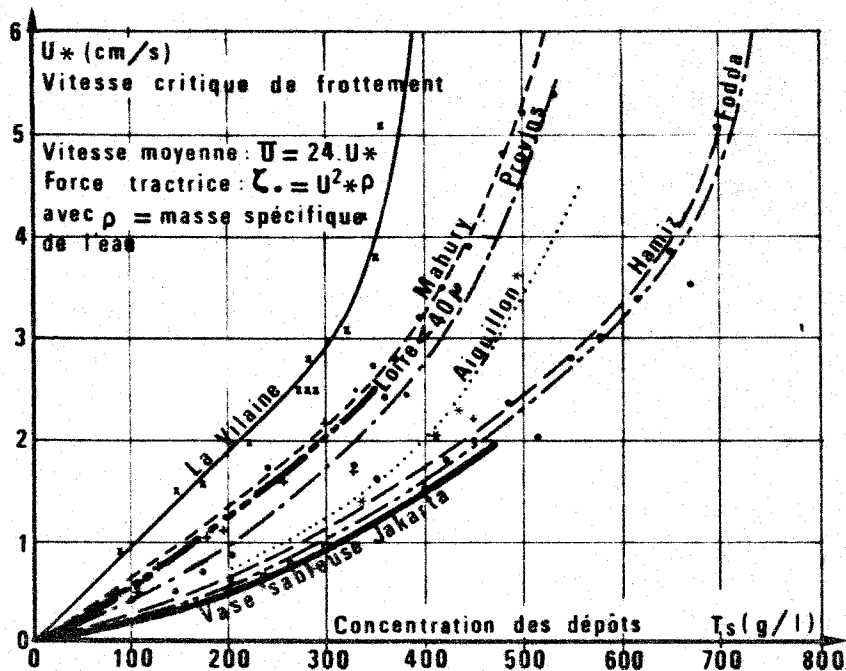
conduit à des valeurs proches de celles que nous avons observées mais sont inférieures pour les très fortes concentrations.

Finalement nous adopterons pour la vase de la Loire (inférieure à 40 microns) les valeurs suivantes pour les tensions de cisaillement de début d'entraînement :

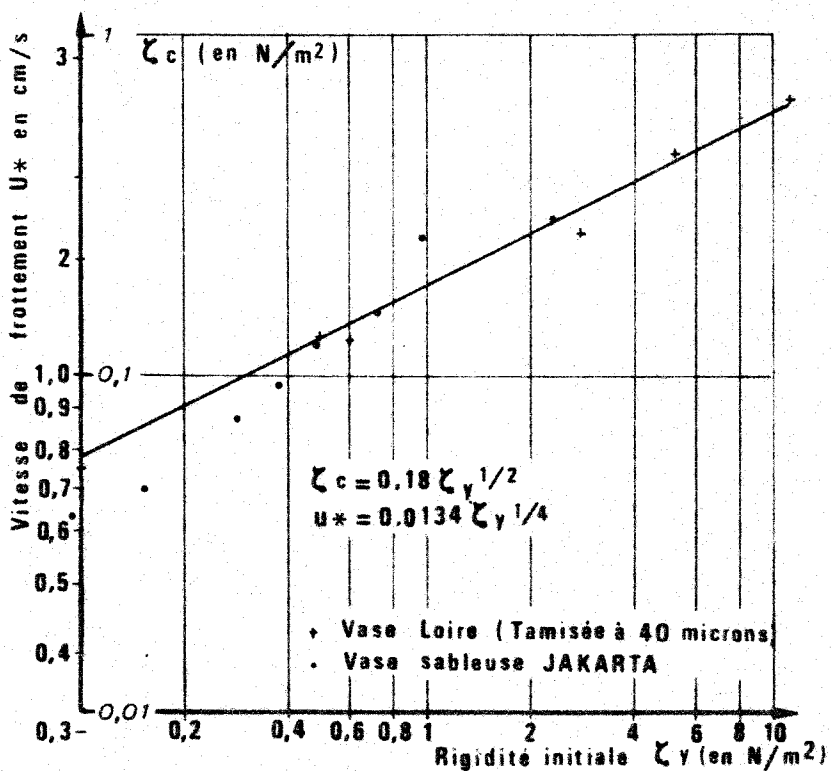
$$\tau_c = \rho U_{*cr}^2$$

que nous comparerons aux valeurs de la rigidité initiale τ_y mesurée au viscosimètre Brookfield :

TENSION DE CISAILLEMENT CRITIQUE D'EROSION DES VASES DE LOIRE ET DE JAKARTA



TENSION CRITIQUE D'EROSION (entraînement généralisé)



T_s (g/l)	133	188	194	262	300	342
u_* (cm/s)	0,8	1,17	1,16	1,64	2,21	2,68
τ_c (N/m ²)	0,064	0,137	0,135	0,27	0,48	0,72
τ_y (N/m ²)	0,1	0,5	0,6	2,8	5,5	11,5

Dans le cas de la vase de Loire tamisée à 40 microns et dépourvue de matières organiques on aurait pour un entraînement généralisé :

$$\tau_c \text{ (N/m}^2\text{)} = 0,2 \tau_y^{1/2} \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

et

$$u_{*c} \text{ (m/s)} = 0,014 \tau_y^{1/4} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

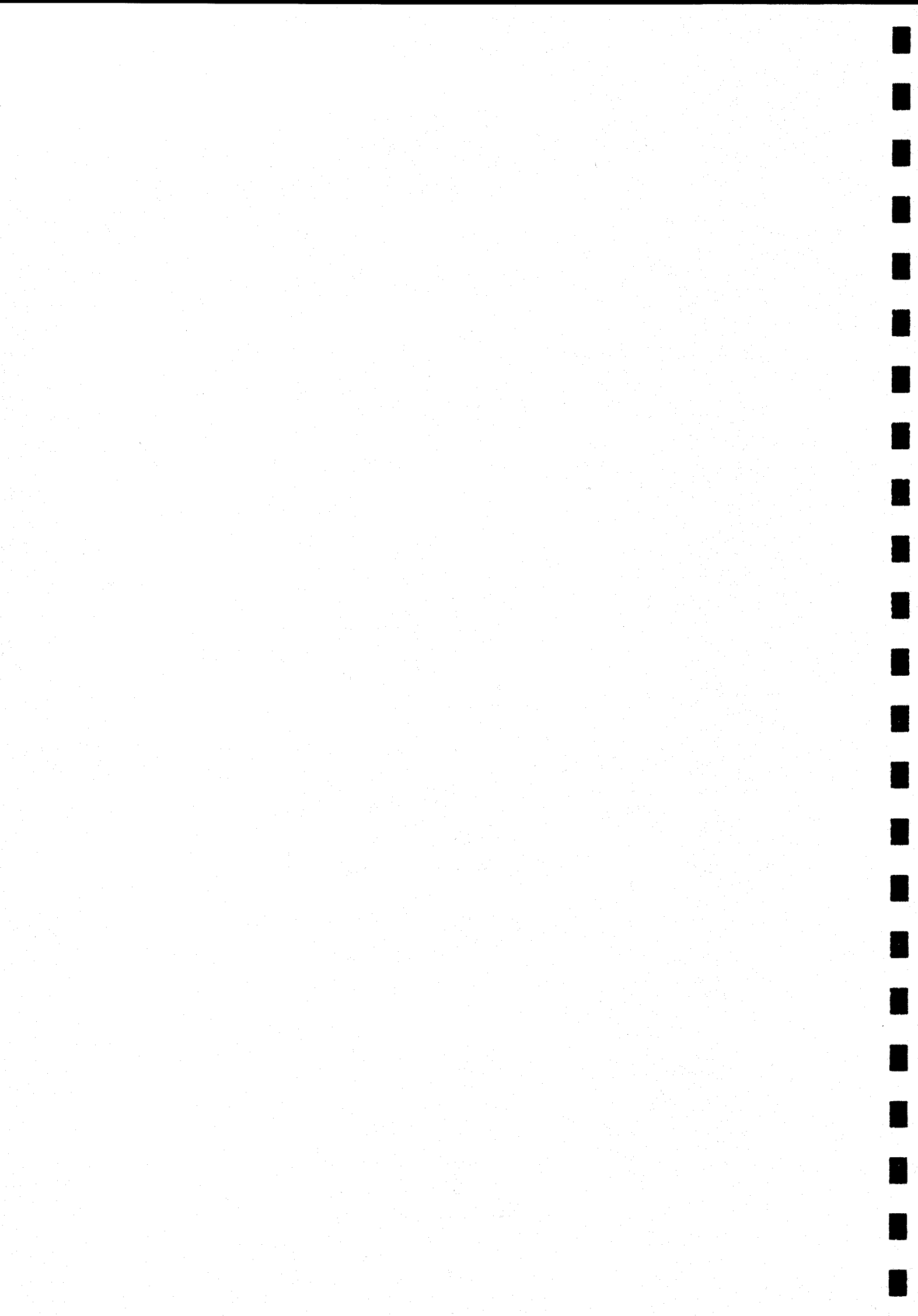
On retrouve pour cette gamme de concentration des lois comparables à celles données antérieurement par le LCHF (réf. 2 et 14). Avec les vases sableuses de Jakarta on aura une loi analogue à condition de caractériser les dépôts de vase par leur rigidité initiale qui reste l'élément fondamental pour définir les actions hydrodynamiques sur des sédiments très fins (figure 7).

2.3. DEBITS SOLIDES DE VASE

2.31. Généralités

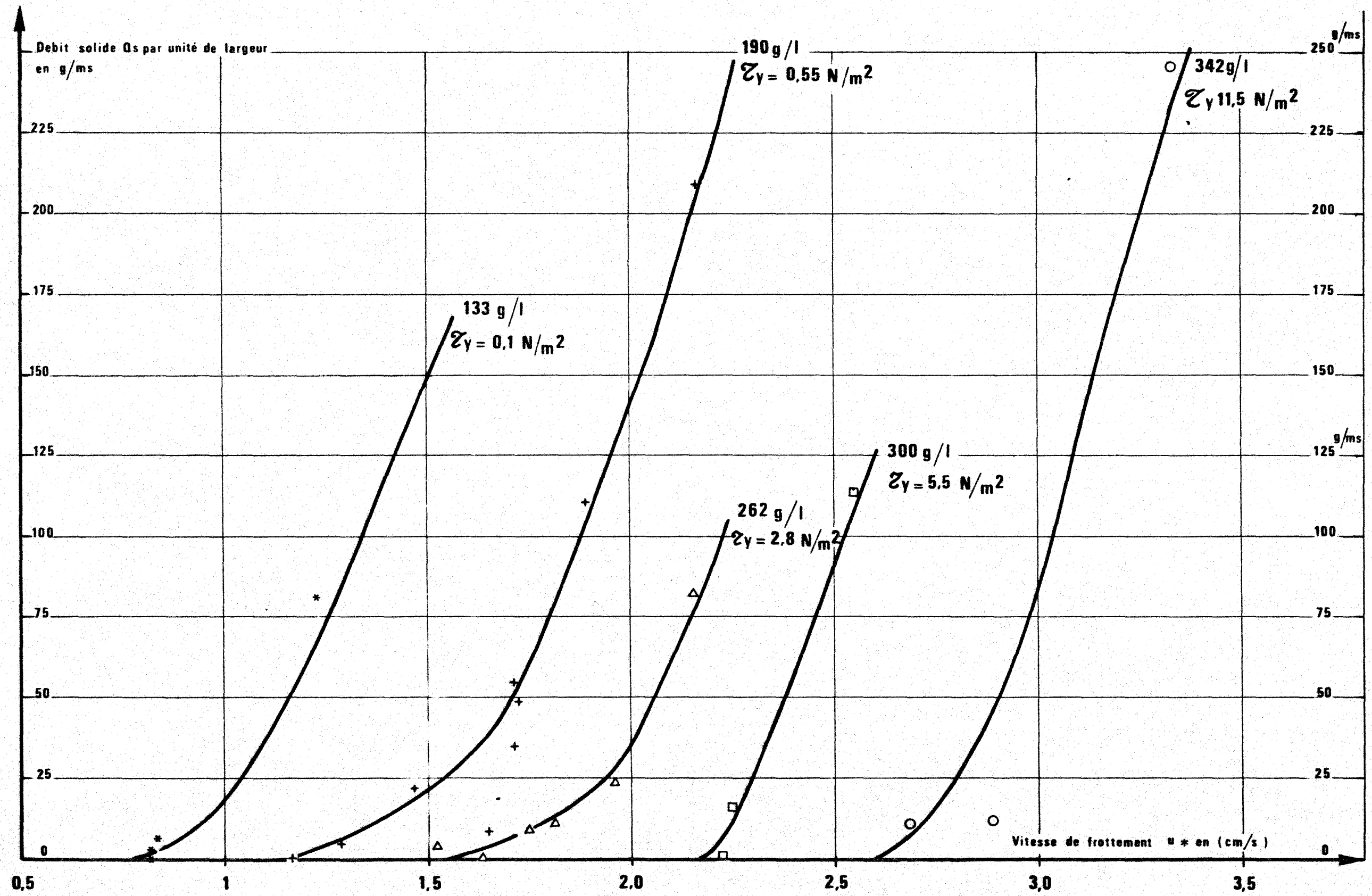
Le débit solide a été estimé à partir de mesures de turbidité de prélèvements réalisées à quatre profondeurs différentes.

Ces mesures effectuées régulièrement -toutes les deux minutes environ- ont montré que la turbidité pouvait varier dans un rapport de 1 à 100 entre la surface et le fond.



VARIATION DU DEBIT SOLIDE PAR UNITE DE LARGEUR POUR DIFFERENTES CONCENTRATIONS EN SEDIMENTS SECS

VASE DE LA LOIRE (INFERIEURE A 40 MICRONS DEPOSEE SUR 3 m DE LONGUEUR x 0.40 m DE LARGEUR



La majeure partie du transport s'effectuait très près du fond, et ceci quel que soit l'état de consolidation de la vase.

Notons que le dispositif d'essais en circuit ouvert permettait de s'affranchir des phénomènes de saturation du mélange eau/vase qui se produisent en circuit fermé.

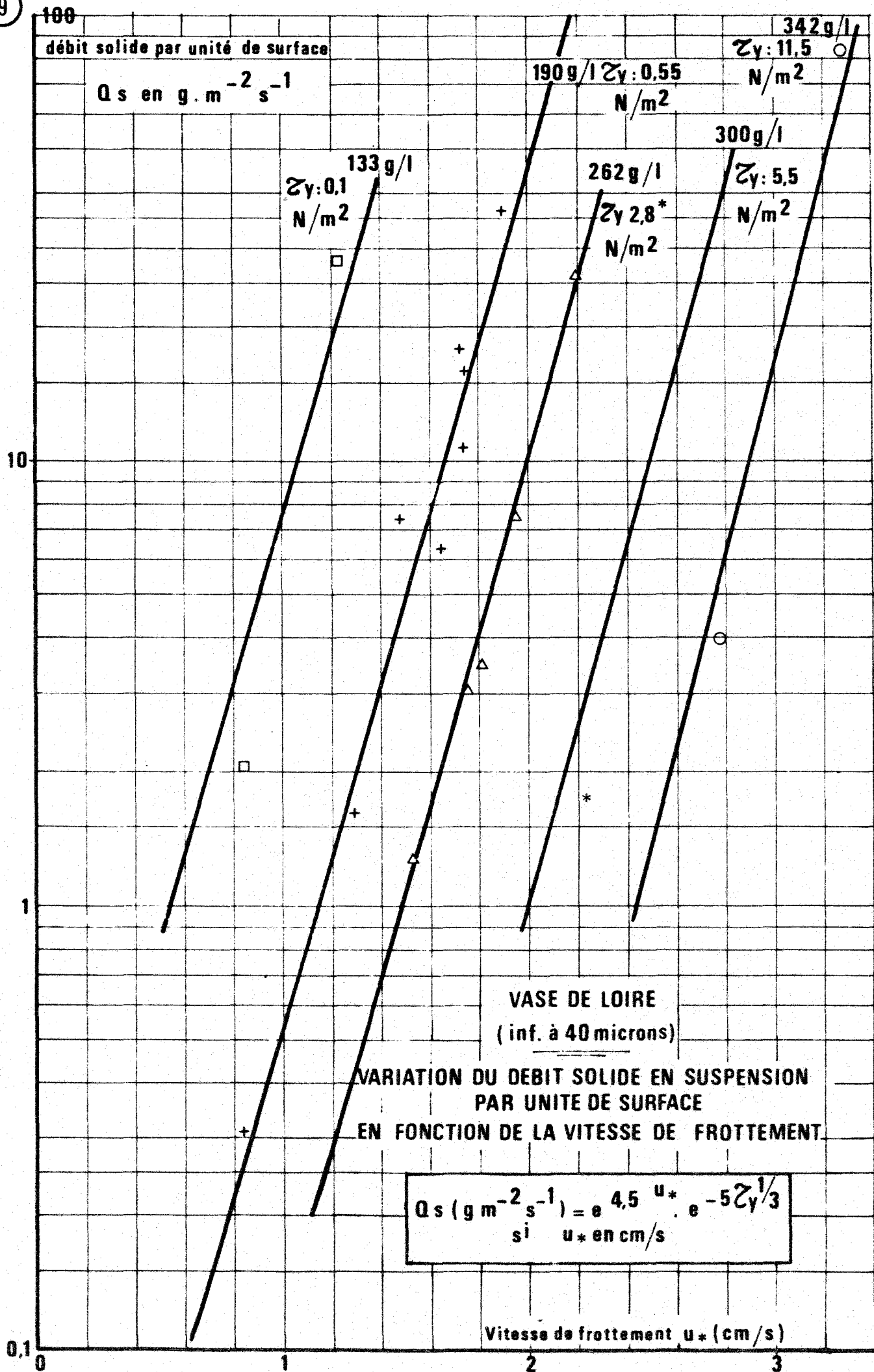
2.32. Résultats des essais

Le tableau ci-après donne les valeurs des différentes grandeurs mesurées lors des essais (surface érodable = 1,20 m²) :

Concentration initiale de la vase T_s g/l	Débit liquide Q l/s	Hauteur d'eau moyenne H cm	Vitesse cisaillement u^* (profil log.) cm/s	Turbidité moyenne T_u g/l	Débit solide Q_s $g\ m^{-2}\ s^{-1}$
133	18,7	19,1	0,83	0,02	0,3
	19,5	19,7	0,84	0,13	2,11
	28,1	19,2	1,24	1,16	27,16
188	34,3	20,0	1,46	0,26	7,43
	40,4	20,0	1,72	0,54	18,18
187	35,5	20,1	1,73	0,55	16,27
	44,6	20,1	1,89	1	37,16
	50,6	20,0	2,16	1,65	69,57
194	29,8	19,4	1,29	0,067	1,66
	38,8	19,7	1,65	0,083	2,68
	41,4	20,0	1,73	0,32	11,04
263	37,2	20,7	1,53	0,04	1,24
	42,6	20,0	1,81	0,11	3,90
	45,3	19,6	1,96	0,21	7,92
261	41,3	20	1,75	0,09	3,10
	51,2	20,2	2,16	0,65	27,73
300	54,3	20,3	2,24	0,105	4,75
	62,2	20,5	2,53	0,73	37,83
342	63,3	20	2,69	0,07	3,69
	69,5	20,5	2,88	0,07	4,05
	76,5	19,5	3,32	1,29	82,23

La valeur de la turbidité T_u est une moyenne, sur toute la durée du palier de débit constant, de la moyenne pondérée des valeurs données par les prélèvements à quatre profondeurs et des mesures données par turbidimètres.

Cette valeur permet d'estimer le débit solide " Q_L " par unité de largeur en $g.m^{-1}.s^{-1}$ (figure 8) ou par unité de surface du lit de vase : Q_s en $g.m^{-2}.s^{-1}$.



Le croquis n° 9 donne, sur papier semi-logarithmique par unité de surface, l'évolution du débit solide, pour différents états de consolidation du lit de vase en fonction de la vitesse de frottement sur le fond u_* .

Les points correspondant à un même essai (concentration initiale donnée) peuvent être joints avec une faible dispersion par des droites dont la pente est à peu près constante (deux essais pour 133 g/l et 300 g/l n'ont fourni que deux points de mesure et sont assez peu significatifs).

Le débit solide unitaire s'écrirait donc sous la forme :

$$\text{Log } Q_s = Au_* + B ; u_* \text{ en cm/s} ; Q_s \text{ en g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

- où
- A est une constante -voisine de 4,5- qui ne dépend pas de l'état de consolidation de la vase
 - B est une fonction décroissante de la concentration initiale de la vase

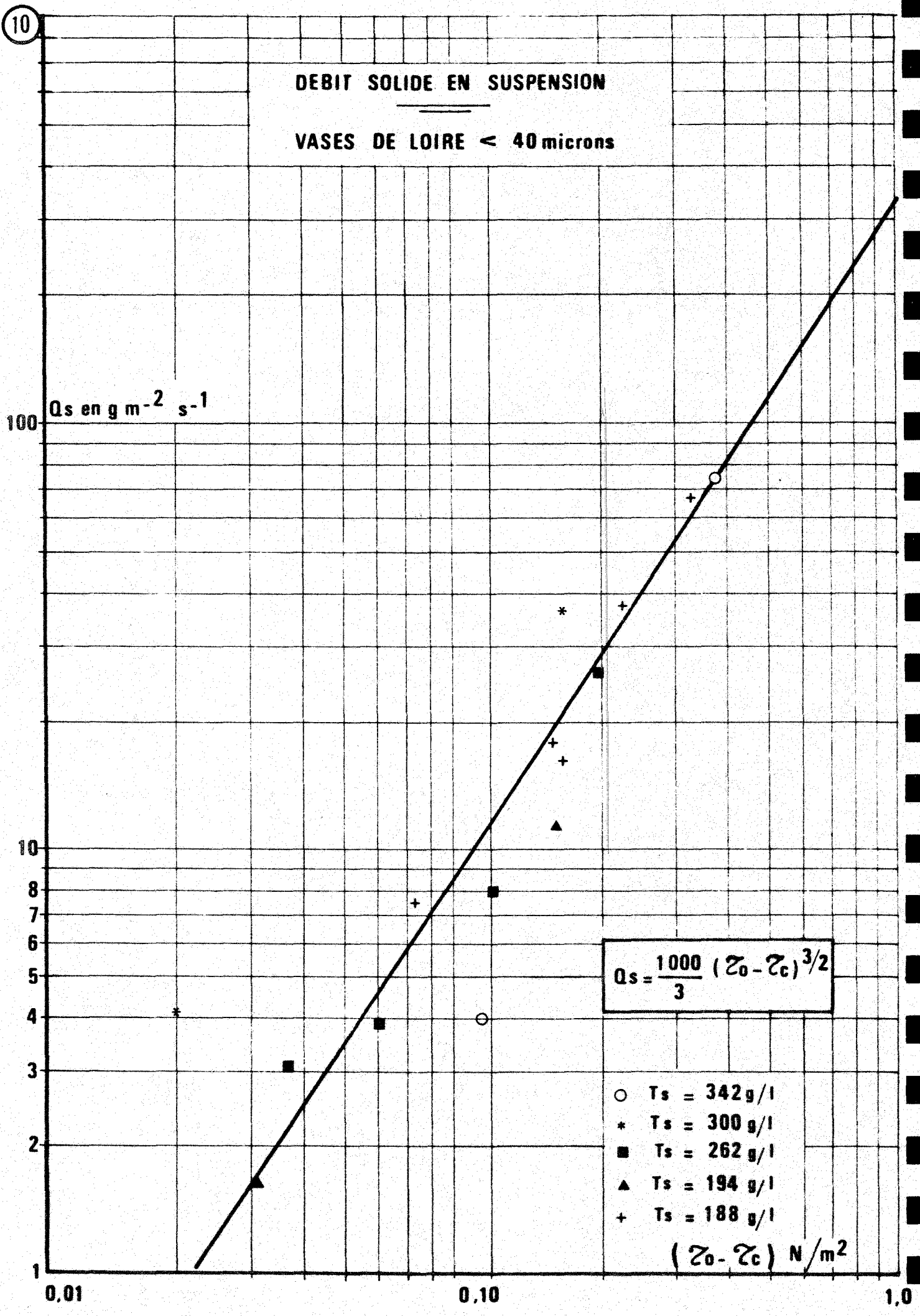
Concentration T_s en g/l	133	190	262	300	342
Rigidité initiale τ_y en N/m^2	0,1	0,55	2,8	5,5	11,5
B (-)	2,47	5,13	6,66	9,0	10,9

Pour la vase de Loire, inférieure à 40 microns, on pourrait exprimer le débit solide par unité de surface par une expression de la forme :

$$\text{Log } Q_s = 4,5 u_* (\text{cm/s}) - 5 \tau_y^{1/3}$$

ou

$$Q_s = e^{4/5} u_* \cdot e^{-5} \tau_y^{1/3}$$



2.33. Recherche d'une formule approchée globale

Le débit solide dépend -pour des conditions hydrauliques données- de l'état de consolidation de la vase. Or celui-ci peut être caractérisé par différents paramètres tels que :

- . la concentration de la vase T_s (g/l)
- . la rigidité initiale τ_y (N m⁻²)
- . la tension de cisaillement critique de début d'entraînement τ_c (N m⁻²)
- . la vitesse de cisaillement critique u_{*c} (m s⁻¹)

Afin d'obtenir une formule approchée globale pour une vase donnée quel que soit son état de consolidation nous avons calculé les coefficients de corrélation du débit solide avec différents groupements de variables -pour l'ensemble des points de mesure-.

La meilleure variable semble être $(\tau - \tau_c)^{3/2}$, c'est-à-dire la puissance trois demie de la différence entre la contrainte de cisaillement sur le fond, créée pour l'écoulement et la contrainte de cisaillement critique de début d'érosion des dépôts de vase.

La figure 10 donne la répartition des points de mesures suivant une expression de la forme :

$$Q_s \text{ (en } g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}) = \frac{1000}{3} (\tau_0 - \tau_c)^{3/2}$$

τ_0 et τ_c étant exprimés en N/m²

τ_c étant une fonction de la rigidité initiale des dépôts τ_y

$$\tau_c = 0,2 \tau_y^{1/2}$$

On voit que le débit solide d'érosion croît d'autant plus vite que la force tractrice est élevée et la rigidité initiale des dépôts plus faible.

A titre d'indication, un fond de vase de 1 m^2 de surface et ayant une rigidité initiale supposée homogène de $1,5 \text{ N/m}^2$ (vase de Loire très fine ayant une concentration de 225 g/l) s'éroderait de 42 gram. par seconde sous l'action d'une tension de cisaillement (ou force tractrice) de $0,5 \text{ N/m}^2$ correspondant à une vitesse de frottement de $2,2 \text{ cm/s}$ et à une vitesse moyenne dans un estuaire de 10 m de profondeur de 1 m/s environ. Au total en 1 heure 150 kg de vase serait érodée sous l'action d'un courant d'eau claire entraînant un abaissement des fonds de crème de vase de $0,65 \text{ m}$ environ.

Par contre, pour des vitesses de $0,75 \text{ m/s}$, l'érosion n'atteindrait que 1 g par m^2 et par seconde, soit $3,6 \text{ kg}$ en 1 heure , représentant une érosion des fonds de $1,6 \text{ cm}$ seulement. Ces valeurs seraient assez voisines de celles que l'on avait pu évaluer dans l'estuaire de la Loire.

Des études plus longues et plus précises seraient nécessaires pour confirmer la validité de ces premiers résultats qui apportent cependant d'ores et déjà des ordres de grandeur sur les débits d'érosion des vases.

* * *

*

CHAPITRE 3

-.--.-

COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR LA VASE FINE DE LA LOIRE AVEC LES RESULTATS OBTENUS SUR UNE VASE SABLEUSE D'INDONESIE ET LES RECHERCHES EFFECTUEES DANS D'AUTRES LABORATOIRES

3.1. ETUDE DU DEBIT SOLIDE DES VASES SABLEUSES DE JAKARTA

Afin d'apporter un complément d'information sur les conditions de transport des vases tout en restant dans le cadre du budget fixé au marché, le LCHF a dirigé le travail de thèse de Docteur Ingénieur de Monsieur S. PRADOTO sur "*l'influence des actions hydrodynamiques sur la remise en suspension des matériaux fins - Problèmes posés par les littoraux d'Indonésie*" (réf. 8).

Les essais ont été effectués dans des conditions expérimentales très voisines de celles adoptées pour les recherches présentées dans le *Chapitre 2*, les mesures rhéologiques étant faites au LCHF, les études de tassement à la Faculté des Sciences d'Orsay et les mesures de débit solide des vases sableuses de Jakarta dans les installations des Travaux Publics de l'Etat à Lyon.

3.11. Caractéristiques des essais

La vase étudiée provient de la baie de Jakarta en Indonésie. Elle comprend une partie (50 %) de sable fin relativement importante, sa cohésion étant ainsi, à concentration globale identique, plus faible que celle d'une vase pure (*figure 2*).

Les essais ont été réalisés dans un canal de dimensions principales :

longueur	12 m
largeur	0,20 m
profondeur	0,30 m

Des vases de différentes concentrations ont été déposées au fond du canal sur une longueur de 2 m. Le débit solide étant augmenté continuellement jusqu'à l'observation du début d'érosion puis par palier de débit constant.

La turbidité de l'eau est mesurée pour chaque débit permettant d'estimer le débit solide correspondant.

3.12. Résultats

A/ Début d'érosion

Le tableau suivant donne les vitesses critiques de début d'entraînement observées avec les vases de différentes concentrations T_s :

T_s ($g\ell^{-1}$)	195	220	245	255	275	285	300	345	390	427
τ_y $N\ m^{-2}$	0,052	0,079	0,097	0,154	0,29	0,37	0,48	0,74	0,97	2,36
u_{*c} $cm\ s^{-1}$	0,57	0,61	0,61	0,68	0,87	0,97	1,13	1,23	1,58	1,72
$N\ m^{-2}$	0,032	0,037	0,037	0,046	0,075	0,094	0,127	0,151	0,25	0,295

On constate tout d'abord que la rigidité initiale (mesurée au Brookfield) varie en fonction de la concentration T_s , en grammes de sédiments secs par litre de mixture, suivant une expression de la forme :

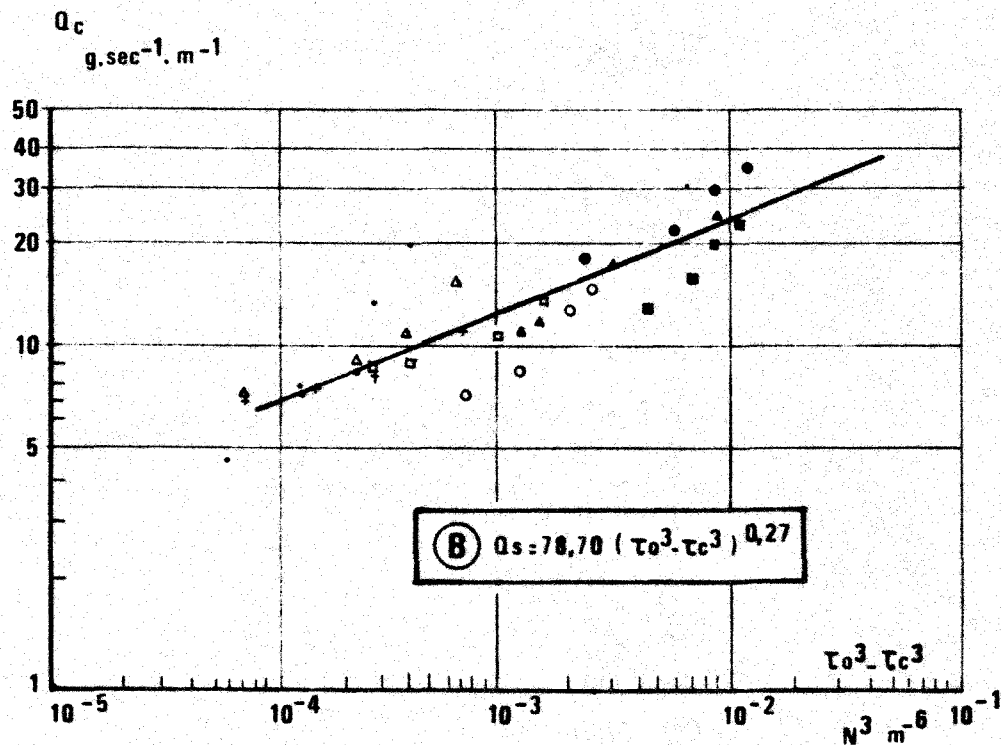
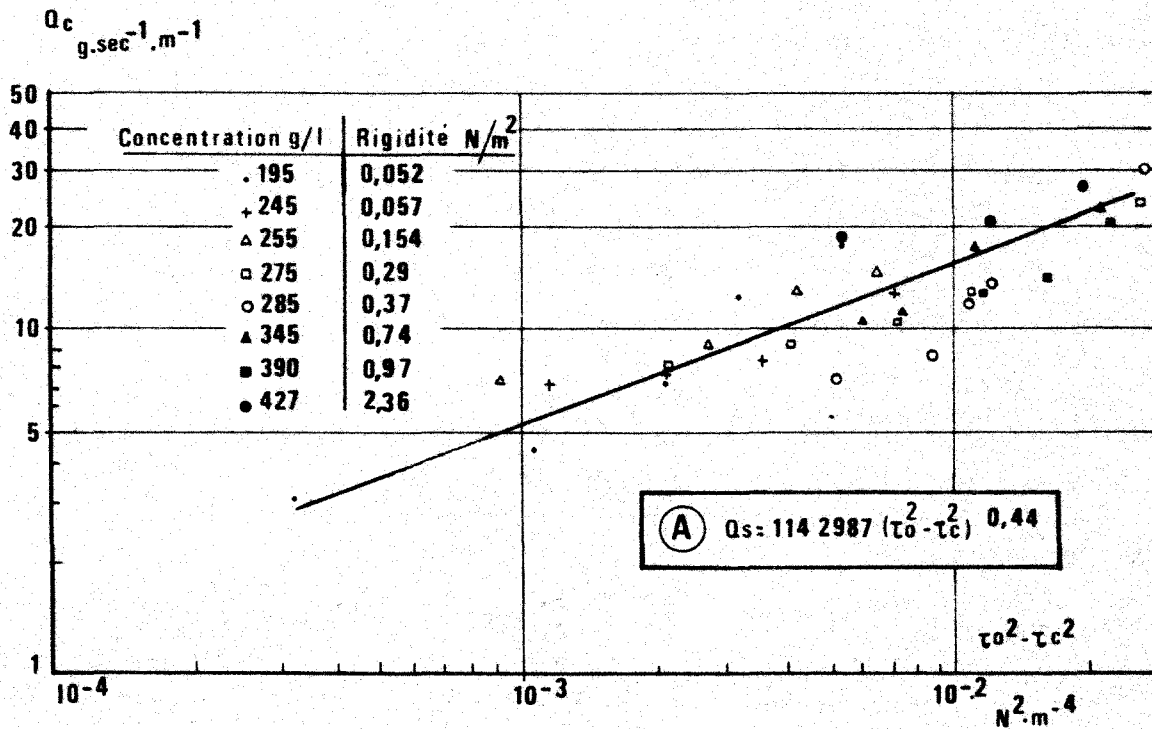
$$\tau_y (N/m^2) = 7 \cdot 10^{-14} T_s^{5,1}$$

Si l'on enlevait la fraction sableuse de cette vase, par tamisage à 40 microns, la rigidité initiale serait, à concentration en sédiments secs égale, environ 3,1 fois plus élevée :

$$\tau_y (N/m^2) \text{ vase tamisée} = 2,2 \cdot 10^{-13} \tau_y^{5,1}$$

VASE SABLEUSE DE JAKARTA

DEBIT SOLIDE EN FONCTION DE LA FORCE DE FROTTEMENT
POUR DIFFERENTES CONCENTRATIONS DE VASES



Pour le début d'entraînement sous l'action d'un courant d'eau on constate que la tension critique d'érosion peut être donnée par une loi approchée de la forme (figure 7) :

$$\tau_c \text{ (N/m}^2\text{)} = 0,18 \tau_y^{1/2}$$

Expression très voisine de celle trouvée pour les vases fines de la Loire. Par contre, si l'on avait exprimé la tension critique d'entraînement (ou la vitesse critique de frottement) en fonction de la concentration des mixtures de vases on aurait trouvé des coefficients très différents entre la vase de Loire tamisée à 40 microns et la vase sableuse de Jakarta. Ce résultat confirme que la rigidité d'une vase ou d'une vase sableuse est bien le paramètre essentiel pour aborder le comportement des dépôts sous les actions hydrodynamiques.

B/ Débit solide

Pour le débit solide en suspension les mesures ont porté, pour chaque concentration des dépôts, sur cinq ou six valeurs différentes de la vitesse de frottement u_* (ou de la tension de cisaillement exercée par l'eau sur les fonds τ_0). Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-après en donnant pour chaque concentration (donc chaque rigidité des dépôts) et en fonction de la vitesse de frottement u_* la force tractrice τ_0 , la turbidité des eaux (Tu mesurée à 0,20 m du fond), le débit solide Q exprimé soit par unité de largeur en $g.m^{-1} s^{-1}$, soit par unité de surface en $g.m^{-2} s^{-1}$.

Dans tous les cas on constate que l'on passe brutalement d'une eau claire à une eau chargée de sédiments lorsque l'on dépasse légèrement la vitesse critique d'érosion : le sol "explose", se rapprochant ainsi des constatations que l'on peut faire en nature. Au-delà le débit solide en suspension augmente suivant des lois qui ont été étudiées par Monsieur PRADOTO.

Les quantités déplacées en suspension seraient, d'après ces expériences rattachées à la tension de cisaillement τ_0 exercée par l'eau sur le fond et à la tension critique de début d'érosion τ_c par des expressions de la forme (figure n° 11) :

$$Q_L \text{ (g/ms)} = 115 (\tau_0^2 - \tau_c^2)^{0,44}$$

$$\text{ou } Q_L \text{ (g/ms)} = 78 (\tau_0^3 - \tau_c^3)^{0,27}$$

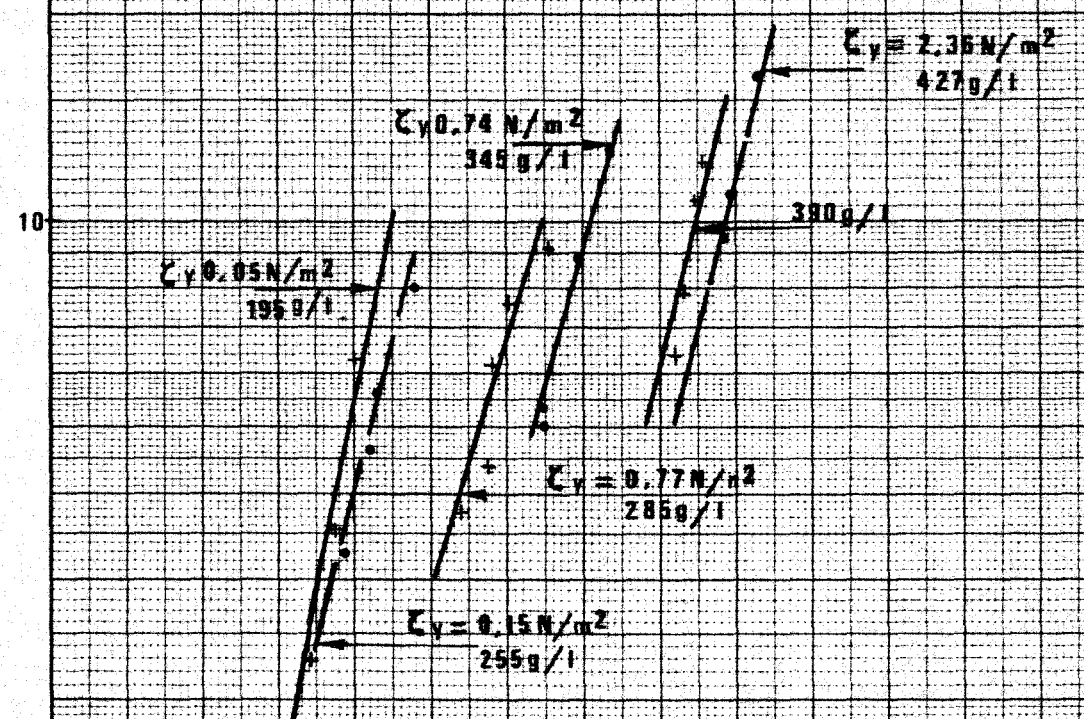
<i>Débits solides des vases sableuses de Jakarta</i>						
<i>Concentration 195 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,052 \text{ N/m}^2$</i>						
u_* (cm/s)	0,57	0,61	0,69	0,75	0,81	0,90
τ_0 (N/m ²)	0,033	0,038	0,047	0,057	0,066	0,080
Tu (g/l)	0	0,108	0,145	0,204	0,319	0,458
QL (g/ms)	0	3,15	4,73	7,27	12,28	19,43
Qs (g/m ² s)	0	1,575	2,365	3,695	6,14	9,715
<i>Concentration 245 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,097 \text{ N/m}^2$</i>						
u_* (cm/s)	0,615	0,72	0,78	0,84	0,97	
τ_0 (N/m ²)	0,037	0,052	0,061	0,071	0,095	
Tu (g/l)	0	0,207	0,211	0,213	0,254	
QL (g/ms)	0	7,05	7,83	8,48	11,70	
Qs (g/m ² s)	0	3,525	3,915	4,24	5,85	
<i>Concentration 255 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,154 \text{ N/m}^2$</i>						
u_* (cm/s)	0,69	0,75	0,84	0,85	0,97	
τ_0 (N/m ²)	0,047	0,057	0,071	0,08	0,095	
Tu (g/l)	0	0,204	0,228	0,269	0,346	
QL (g/ms)	0	7,28	9,09	11,39	15,9	
Qs (g/m ² s)	0	3,64	0,545	5,695	7,95	
<i>Concentration 275 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,29 \text{ N/m}^2$</i>						
u_* (cm/s)	0,87	0,95	1,0	1,06	1,15	
τ_0 (N/m ²)	0,075	0,09	0,10	0,11	0,13	
Tu (g/l)	0	0,19	0,195	0,211	0,248	
QL (g/ms)	0	8,51	9,19	10,64	13,5	
Qs (g/m ² s)	0	4,255	4,595	5,32	6,75	

<i>Débits solides des vases sableuses de Jakarta</i>					
<i>Concentration 285 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,37$ N/m²</i>					
u_* (cm/s)	0,97	1,09	1,15	1,19	1,23
τ_0 (N/m ²)	0,095	0,118	0,132	0,142	0,151
Tu (g/l)	0	0,15	0,165	0,22	0,26
QL (g/ms)	0	7,54	8,86	12,4	15,3
Qs (g/m ² s)	0	3,77	4,43	6,2	7,65
<i>Concentration 345 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,74$ N/m²</i>					
u_* (cm/s)	1,23	1,305	1,32	1,38	1,46
τ_0 (N/m ²)	0,15	0,17	0,175	0,19	0,21
Tu (g/l)	0	0,18	0,19	0,275	0,35
QL (g/ms)	0	10,88	11,97	17,86	24,16
Qs (g/m ² s)	0	5,44	5,985	8,93	12,08
<i>Concentration 390 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 0,97$ N/m²</i>					
u_* (cm/s)	1,58	1,66	1,68	1,71	1,74
τ_0 (N/m ²)	0,25	0,27	0,28	0,29	0,30
Tu (g/l)	0	0,16	0,20	0,265	0,305
QL (g/ms)	0	12,6	15,9	21,5	25,05
Qs (g/m ² s)	0	6,3	7,95	10,75	12,52
<i>Concentration 427 g/l - Rigidité initiale $\tau_y = 2,36$ N/m²</i>					
u_* (cm/s)	1,73	1,75	1,79	1,82	1,86
τ_0 (N/m ²)	0,29	0,31	0,32	0,33	0,345
Tu (g/l)	0	0,23	0,255	0,345	0,378
QL (g/ms)	0	19,25	21,6	29,7	33,2
Qs (g/m ² s)	0	9,625	10,8	14,85	16,6

100 $0s$ en $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

VASE SABLEUSE A JAKARTA

DEBIT SOLIDE PAR UNITE DE SURFACE EN FONCTION DE LA VITESSE DE FROTTEMENT U_*



$\log T_c = 4.5U_* + B$

Lorsque l'on compare directement les résultats obtenus sur la vase sableuse de Jakarta, avec un canal d'essais deux fois moins large que celui utilisé pour la vase de Loire tamisée à 40 microns et avec un autre opérateur, on constate une certaine analogie entre les résultats.

En particulier si l'on représente le débit solide par unité de surface en fonction de la vitesse de frottement u_* , on obtient des droites, dans un système semi-logarithmique, dont les pentes sont identiques (*figure 12*) et correspondent à une expression de la forme :

$$\log Q_s = 4,5 u_* + B$$

Par contre les débits solides mesurés sur les vases de Jakarta sont, à concentration en particules solides identique dans les dépôts, bien supérieurs pour une même vitesse de frottement à ceux mesurés sur les vases de la Loire. Par exemple pour une vase de Loire ayant une concentration de 190 g/l, le débit solide atteint 0,5 g/m².s pour une vitesse de frottement de 1 cm/s, il serait égal à 13 g/m².s pour une vase sableuse de Jakarta de même concentration, soit 25 à 26 fois supérieur. Ce fait est dû à la présence des éléments sableux en quantité abondante dans les vases de Jakarta qui conduisent à une réduction de la rigidité initiale pour des concentrations identiques en sédiments secs.

Si l'on compare les courbes en fonction de leur rigidité initiale, on constate que les débits solides sont, pour une même rigidité et une même vitesse de frottement, beaucoup plus voisins les uns des autres. Par exemple, pour une rigidité initiale de 0,10 à 0,15 N/m², correspondant à des concentrations de vase de Loire de 135 g/l et à des concentrations de vase de Jakarta de 250 g/l, on aurait pour une vitesse de frottement de 1 cm/s des débits solides de 8 g/m².s pour les vases de Loire et de 10 g/m².s pour des vases de Jakarta.

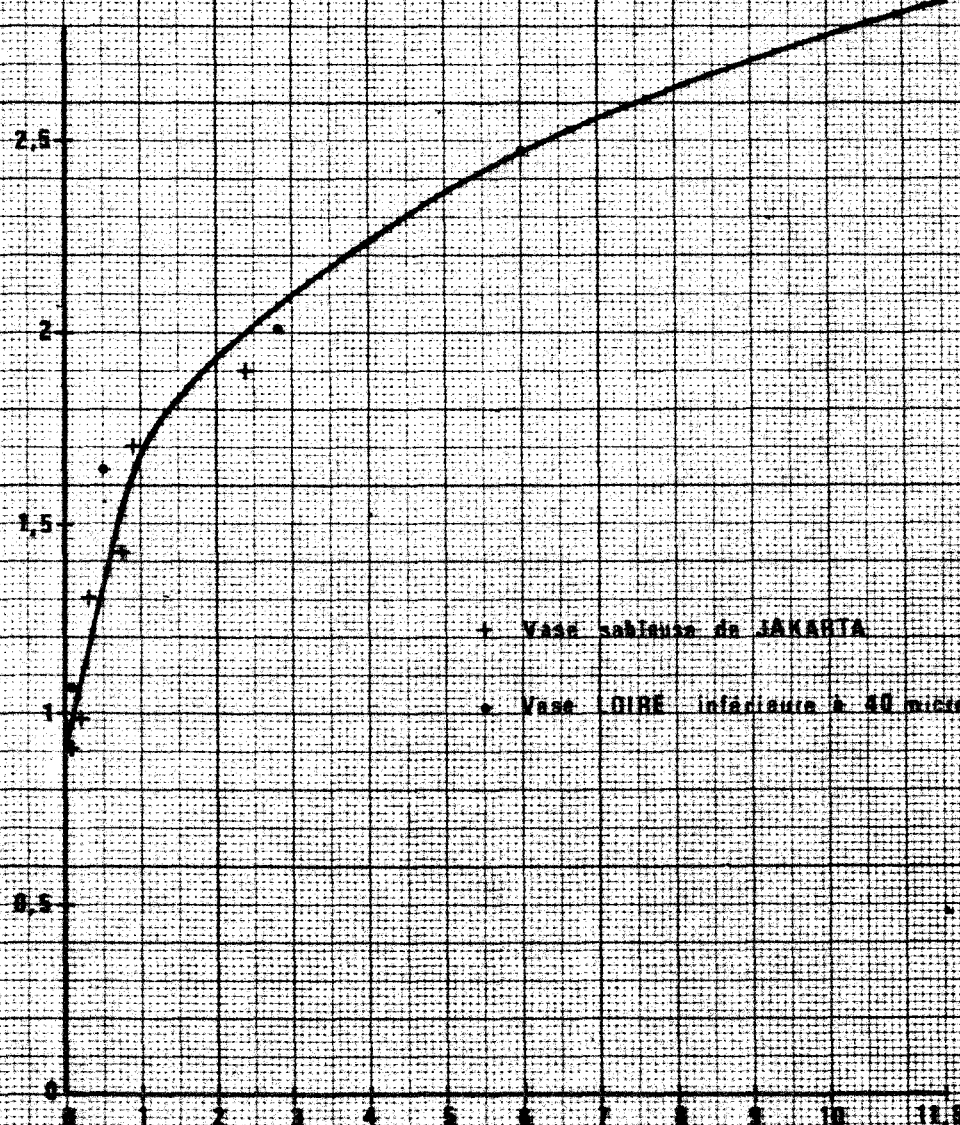
L'étendue des mesures n'est pas suffisante pour que l'on puisse en tirer des lois précises, les résultats obtenus ne permettant que de mettre en évidence des tendances générales.

Sur la *figure n° 13* nous avons toutefois donné la comparaison entre les vitesses de frottement u_* nécessaires pour provoquer un débit solide d'érosion de 10 g.m².s (soit 36 kg/m².h) pour différentes vases de rigidité initiale τ_y connues. On constate que pour des rigidités équivalentes de vases fines de Loire (inférieures à 40 microns) et des vases sableuses de Jakarta (50 % de sable) on obtient pratiquement la même courbe.

Notons qu'avec les vases de Jakarta on ne retrouve pas une loi du type "Loire" permettant de rattacher directement le débit solide par unité de surface à la puissance trois demie de la différence entre la tension de cisaillement exercée par l'eau sur les fonds et la tension critique d'érosion.

COMPARAISON ENTRE LES VITESSES DE FROTTEMENT U_s (en cm/s)
NECESSAIRES POUR PROVOQUER UN DEBIT SOLIDE EN DE
PAR m^2 ET PAR SECONDE POUR DIFFERENTES VASES
DE RIGIDITE INITIALE C_y (en N/m^2) CONNUES

Vitesse de frottement
 U_s en cm/s



+ Vase sableuse de JAKARTA
o Vase LOIRE inférieure à 40 microns

Rigidité initiale C_y (en N/m^2)

3.2. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'AUTRES LABORATOIRES

Des expériences de mesures des débits solides des vases ont été réalisées dans divers laboratoires français et étrangers dans des conditions expérimentales souvent très différentes de celles utilisées au LCHF.

Parmi ces études citons celles de H.A. EINSTEIN et KRONE en 1962 (réf. 15), P. CORMAULT en 1972 avec des essais en tunnel en circuit fermé (réf. 12), M.W. OWEN en 1972 avec des essais en canal à circuit fermé (réf. 16), E. PARTHENIADES en 1970, il s'agit d'essais de dépôt de vase (réf. 9), R. ARIATHURAI en 1972, les études ayant été faites dans une cuve rotative (réf. 17), J.W. KAMPHUIS en 1983 avec des essais en tunnel sous-pression (réf. 13), enfin par Y.P. SHENG en Septembre 1983, les recherches ayant été faites dans une cuve circulaire de 1 m de diamètre (réf. 18).

3.21. P. CORMAULT

Pour P. CORMAULT, à partir de mesures effectuées au LNH, en écoulement en charge dans une conduite de 400 mm de diamètre, sur des vases de la Gironde, le débit solide transporté en suspension serait égal à :

$$Q_s = \frac{dm}{dt} = M \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} - 1 \right) = M \left[\left(\frac{u_*}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \right]$$

La valeur de u_{*c} critique serait rattachée à la concentration T_s des dépôts par une expression de la forme :

$$u_{*c} \text{ (en cm/s)} = 0,0055 T_s + 0,0000026 T_s^2$$

Si T_s est donné en g/l et pour des concentrations comprises entre 150 et 450 g/l.

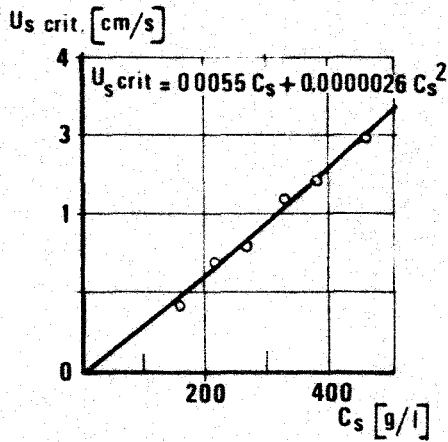
La valeur de la constante de proportionnalité "M" serait de :

$$M = 2.10^{-5}$$

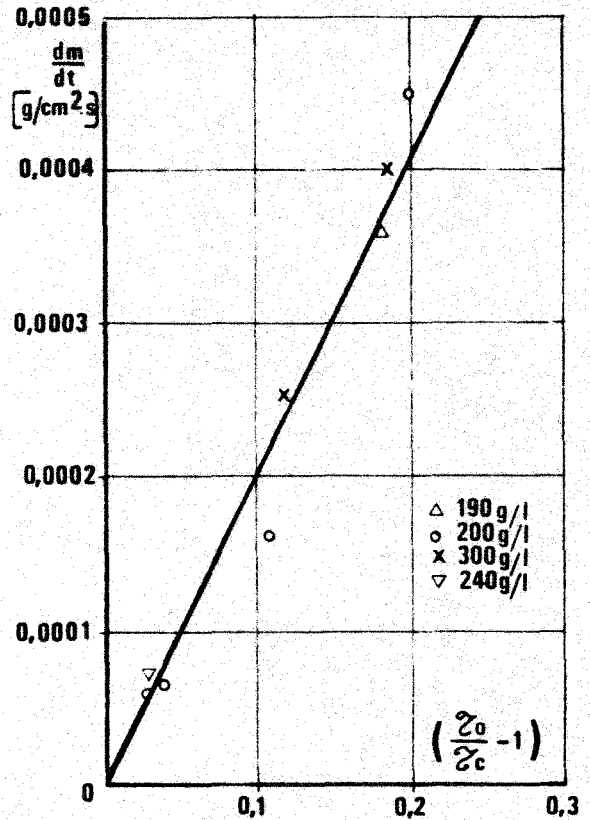
Si Q_s est exprimé en $g.cm^{-2}.s^{-1}$ ou de 0,2 si Q_s est exprimé en $g.m^{-2}.s^{-1}$

DEBIT SOLIDE D'EROSION DE LA VASE

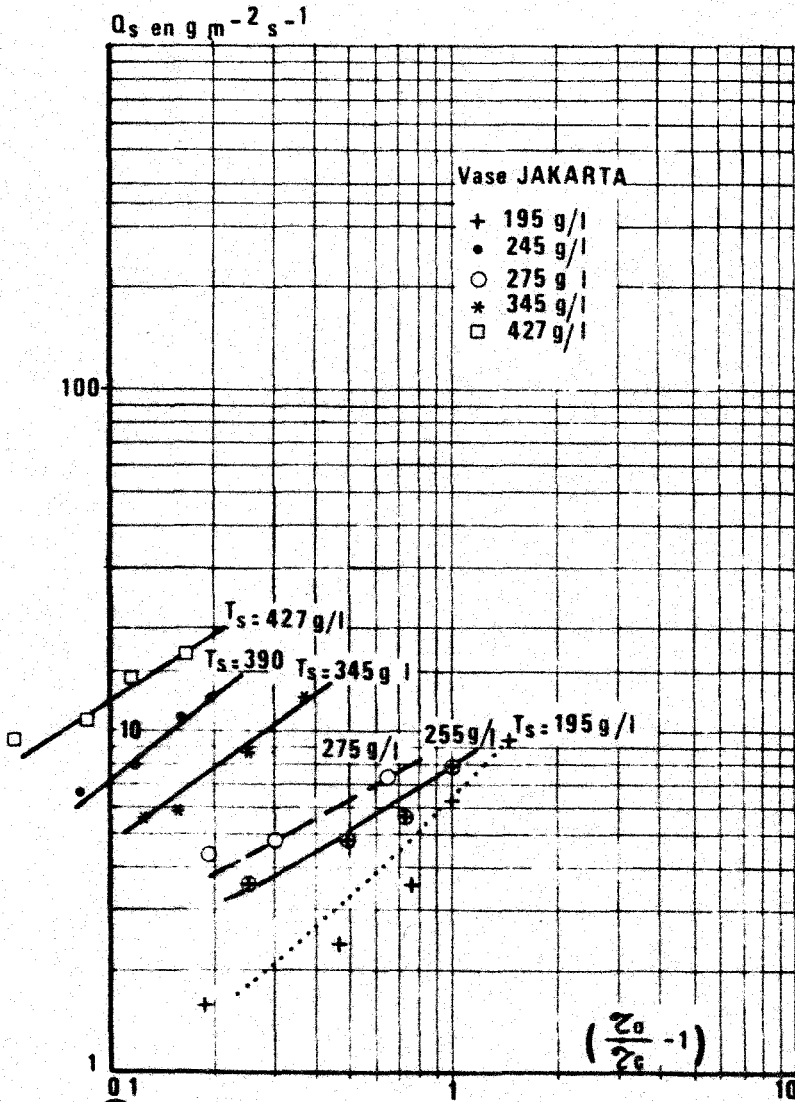
COMPARAISON AVEC LA FORMULE de P. CORMAULT



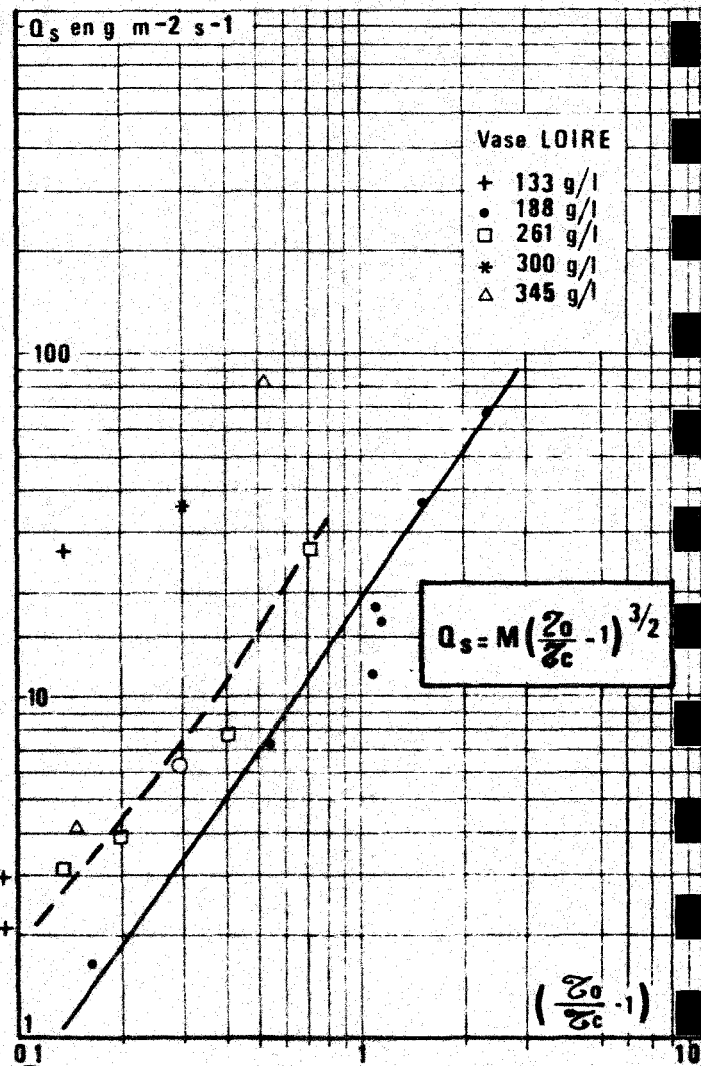
(A) - Début de mise en suspension de la vase de GIRONDE



(B) - Débit solide d'érosion de la vase (gironde)



(C) - Vase sableuse à JARKARTA



(D) - Vase fine de LOIRE

Ce coefficient ne serait toutefois pas en accord avec le croquis correspondant (que nous reproduisons dans la *figure 14*) et qui donnerait pour une valeur de :

$$\left(\frac{I_0}{I_c} - 1\right) = 0,1 \text{ une valeur de } \frac{dm}{dt} = 0,0002 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ soit } 2 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$\text{et de } 4 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ pour une valeur de } \left(\frac{I_0}{I_c} - 1\right) = 0,2$$

Le coefficient M donné par cette figure serait donc de :

$$M = 20 \text{ si } Q_s = \frac{dm}{dt} \text{ est exprimé en g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

soit 100 fois plus important que celui donné dans la formule (ce coefficient de 20 semble plus raisonnable que celui donné dans le texte).

Si l'on représente les résultats obtenus sur les vases sableuses de Jakarta ou les vases fines de la Loire en fonction de $\frac{I_0}{I_c} - 1$

on obtient une très grande dispersion des valeurs, le débit solide étant d'autant plus important que la concentration des vases est plus élevée.

Précisons toutefois que les études du LCHF ont porté sur des gammes beaucoup plus étendues de concentrations et des vitesses de frottement beaucoup plus élevées. Si l'on adopte pour le coefficient M une valeur de 20 (avec Q_s en $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) les valeurs trouvées par P. CORMAULT sur les vases de Gironde de 190 à 240 g/l ne sont pas très éloignées de celles que l'on trouverait sur des vases de Loire de 260 g/l environ.

Pour une concentration de 190 g/l des vases de Loire on pourrait éventuellement proposer une formule de la forme :

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

avec $M = 19$ pour une concentration des vases de Loire de 190 g/l, la valeur de M étant une fonction croissante de la concentration en particules solides.

Cette expression est moins satisfaisante, pour les vases de Loire, que celle proposée par le LCHF au *Chapitre 2* :

$$Q_s = \frac{1000}{3} (\tau_0 - \tau_c)^{3/2} \quad (Q_s \text{ en g.m}^{-2}\text{.s}^{-1})$$

3.22. M.W. OWEN

Pour M.W. OWEN, à partir d'essais en canal, mais en circuit fermé de petite longueur (7 m de longueur), le débit solide par mètre de surface serait :

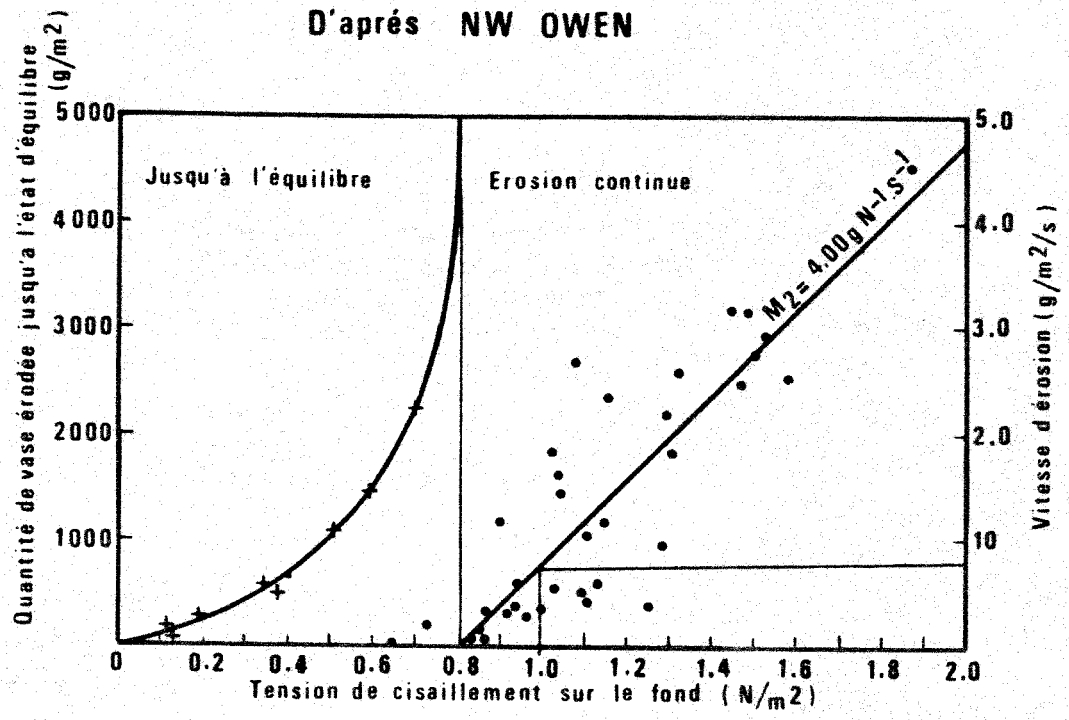
$$m_e = \frac{dm}{dt} = Q_s = M_2 (\tau - \tau_c)$$

avec $\tau_c = 0,81 \text{ N/m}^2$

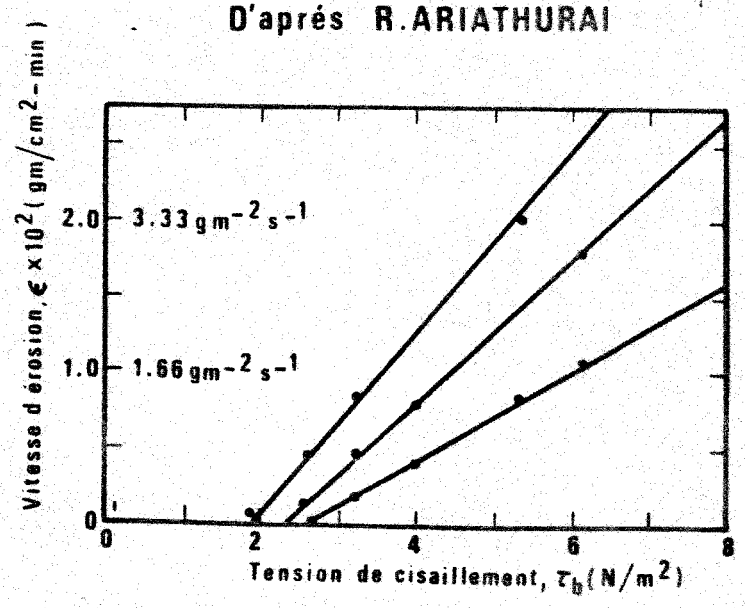
et $M_2 = 4 \text{ g.N}^{-1}\text{.s}^{-1}$

En effectuant des essais sur des vases de la Tamise la tension critique d'entraînement serait plus faible et le coefficient M différent :

(A) COURBES DONNANT LE DEBIT SOLIDE DES VASES
D'après NW OWEN



(B) COURBE DONNANT LE DEBIT SOLIDE D'EROSION
D'après R. ARIATHURAI



Pour une concentration de 190 g/l des vases de Loire on pourrait éventuellement proposer une formule de la forme :

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

avec $M = 19$ pour une concentration des vases de Loire de 190 g/l, la valeur de M étant une fonction croissante de la concentration en particules solides.

Cette expression est moins satisfaisante, pour les vases de Loire, que celle proposée par le LCHF au *Chapitre 2* :

$$Q_s = \frac{1000}{3} (\tau_0 - \tau_c)^{3/2} \text{ (} Q_s \text{ en g.m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{)}$$

3.22. M.W. OWEN

Pour M.W. OWEN, à partir d'essais en canal, mais en circuit fermé de petite longueur (7 m de longueur), le débit solide par mètre de surface serait :

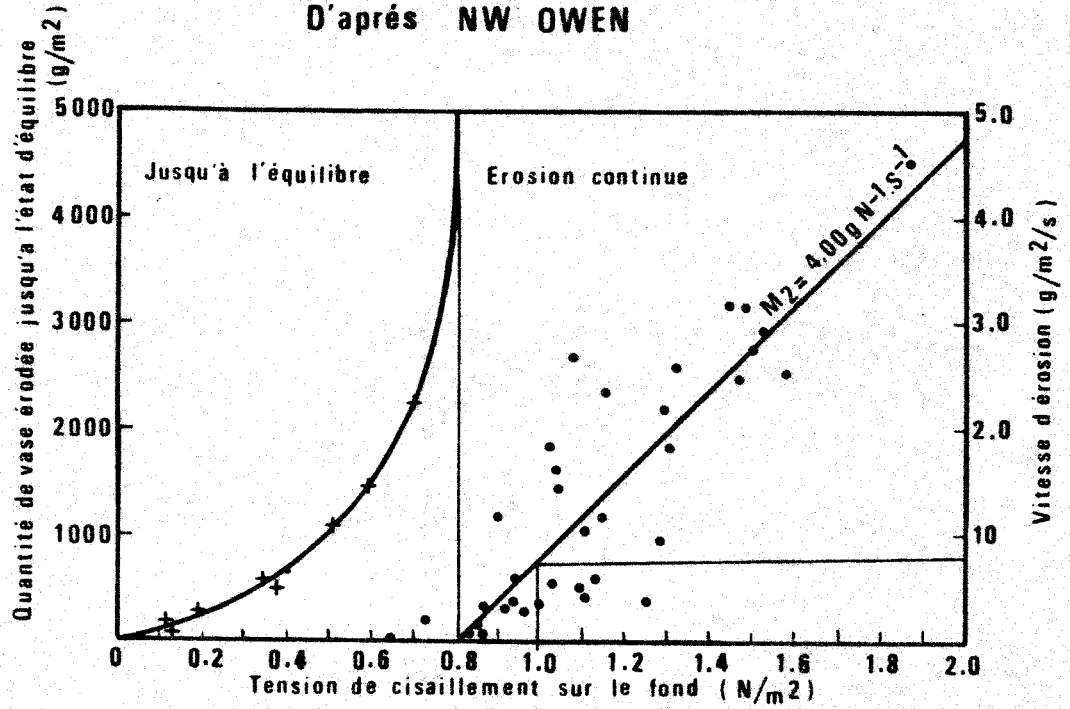
$$m_e = \frac{dm}{dt} = Q_s = M_2 (\tau - \tau_c)$$

avec $\tau_c = 0,81 \text{ N/m}^2$

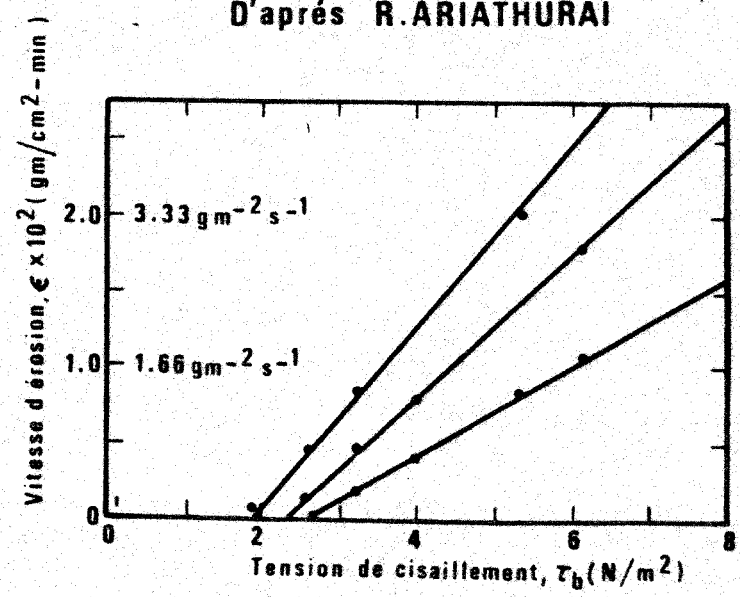
et $M_2 = 4 \text{ g.N}^{-1}\text{.s}^{-1}$

En effectuant des essais sur des vases de la Tamise la tension critique d'entraînement serait plus faible et le coefficient M différent :

(A) COURBES DONNANT LE DEBIT SOLIDE DES VASES
 D'après NW OWEN



(B) COURBE DONNANT LE DEBIT SOLIDE D'ÉROSION
 D'après R. ARIATHURAI



$$\tau_c = 0,34 \text{ N.m}^{-2} \quad \text{et} \quad M_2 = 2,65 \text{ g.N}^{-1}.\text{s}^{-1}$$

On trouvera sur la *figure 15.A* les courbes données par M.W. OWEN.

Notons qu'en exprimant les résultats des études faites au LCHF suivant une expression en $\tau_0 - \tau_c$ les points de mesures pour les vases de la Loire se groupaient assez bien (*figure n° 10*) alors qu'une dispersion subsistait pour les vases de Jakarta.

Il est difficile de rapprocher les résultats de M.W. OWEN de ceux trouvés par le LCHF car M.W. OWEN ne précise pas les caractéristiques des vases étudiées et, notamment les valeurs de leur rigidité initiale τ_y .

3.23. R. ARIATHURAI

R. ARIATHURAI en étudiant la remise en suspension des vases dans un appareil rotatif (bac circulaire avec des pales tournant pour entraîner l'eau) constate que les quantités de vases érodées augmentent avec la tension de cisaillement exercée par l'eau sur les fonds et que les valeurs trouvées dépendent de la nature des sols étudiés, elles sont d'autant plus faibles que le sol est plus dense (*figure 15.B*). Il semble que ces expériences aient été réalisées sur des vases ayant subi une consolidation appréciable puisque la tension critique de cisaillement est comprise entre 2 et 2,3 N.m^{-2} , soit une vitesse de frottement de 4,5 cm/s environ, correspondant à une vitesse moyenne d'érosion de près de 1,50 m/s.

R. ARIATHURAI a donné une valeur du débit solide d'érosion par une expression de la forme :

$$\frac{dm}{dt} = Q_s = M \left(\frac{\tau b}{\tau_c} - 1 \right)$$

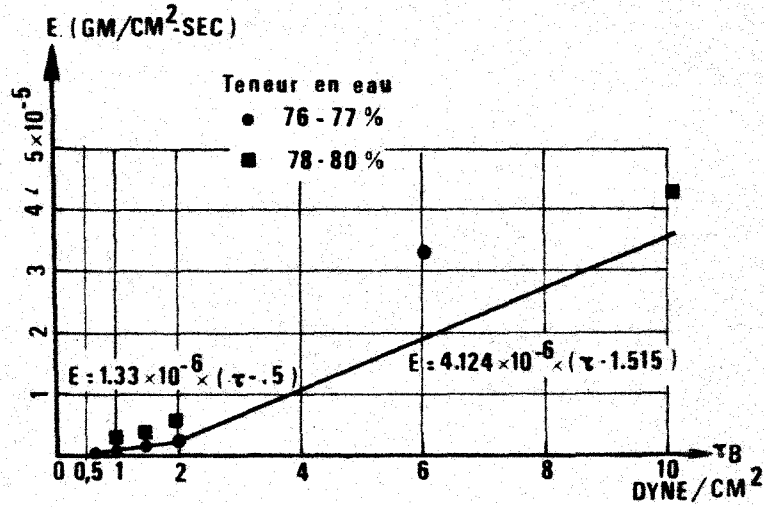
la valeur du terme M dépendant de la nature des vases.

3.24. Y.P. SHENG

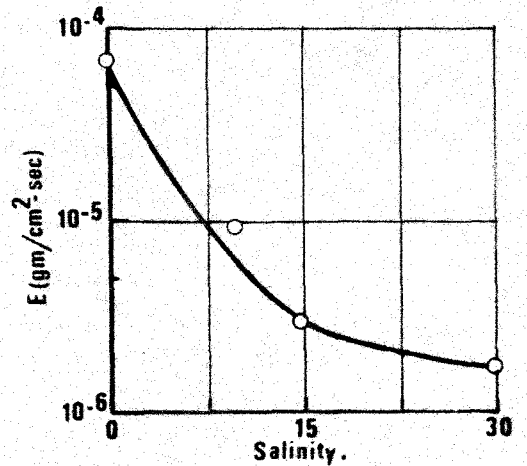
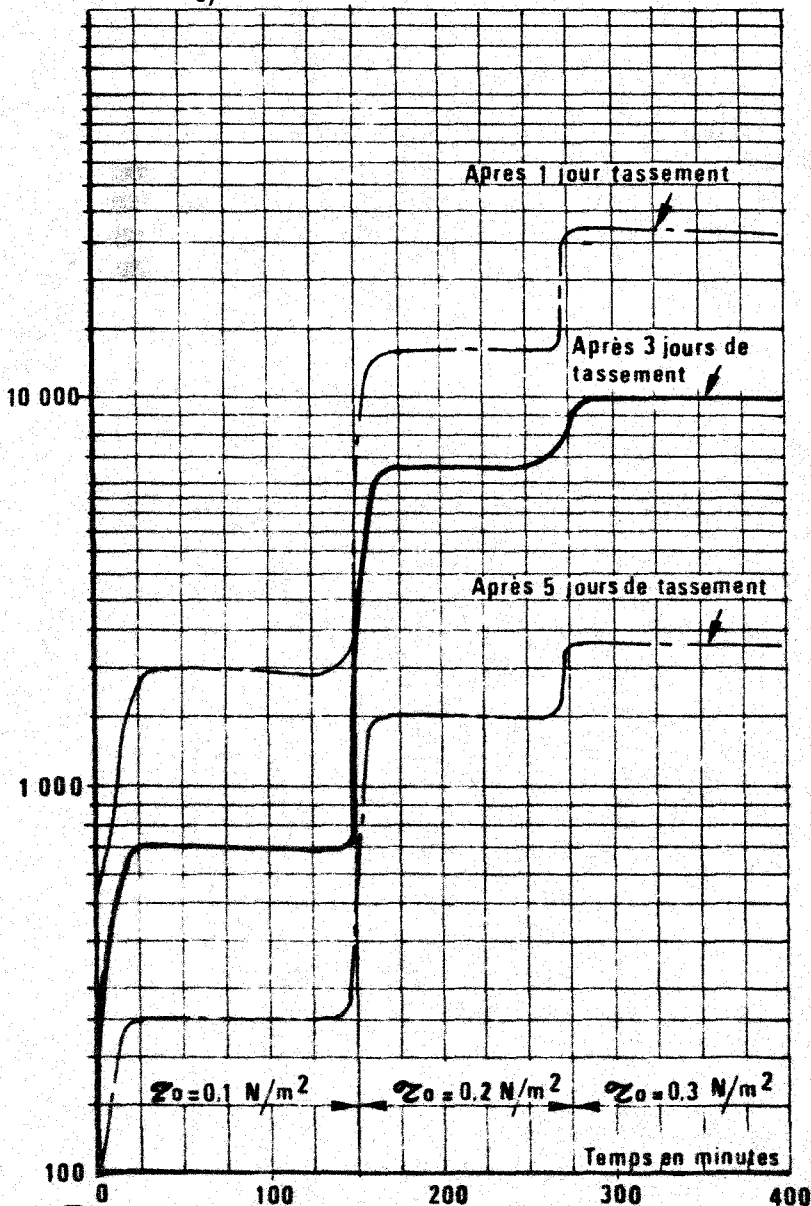
Y.P. SHENG, dans une étude récente faite pour le CERC, a examiné les conditions de remise en suspension et les débits solides de différentes vases soumises à des tensions de cisaillement croissantes. Les essais étaient réalisés dans un bac circulaire de 1 m de diamètre, les vases étant disposées

(VASE DU MISSISSIPI)

(A) Débit solide en fonction de la tension de cisaillement



Turbidité en mg/l



(C) Influence de la salinité des eaux sur le débit solide ($\tau_0 = 0.3 \text{ N/m}^2$)

(B) Influence du temps du tassement de la vase sur la remise en suspension

dans une couronne de 15 cm de largeur et l'eau entraînée par des pales tournant à vitesse variable. Il s'agit donc d'une installation assez limitée pour étudier les débits solides des vases sous l'action des courants.

Quatre vases différentes du Mississippi ont été expérimentées avec des pourcentages de sable de 8 - 22 - 28 et 90 %, la fraction argileuse étant constituée principalement de Smectite (Montmorillonite) à raison de 70 % et d'un mélange de Kaolinite et d'Illite.

Il est difficile, à partir de cette étude, d'évaluer le débit solide entraîné en suspension par un courant.

En exprimant le débit solide en $g.cm^{-2}.s^{-1}$ et la tension de cisaillement en dyne cm^{-2} , on aurait une relation de la forme (figure 16.A) :

$$Q_s = 4,124 \times 10^{-6} (\tau - 1,515)$$

Autrement dit, pour une tension de cisaillement $\tau_0 = 0,50 N/m^2 = 5 \text{ dynes/cm}^2$, le débit solide Q_s serait :

$$Q_s = 4,124.10^{-6} (5 - 1,515) = 1,4.10^{-5} g.cm^{-2}.s^{-1} = 0,14 g m^{-2}.s^{-1}$$

et pour une valeur de $\tau_0 = 1 N/m^2$:

$$Q_s = 0,35 g.m^{-2}.s^{-1}$$

Ces valeurs sont extrêmement faibles, très loin de celles que l'on a pu mesurer dans un canal au LCHF et sans commune mesure par rapport à la nature.

Par contre, en examinant les turbidités des eaux pour différentes tensions de cisaillement et différents temps de tassement des vases, on obtient des renseignements intéressants pour mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent (figure 16.B) :

- La remise en suspension dépend du temps de tassement de la vase, pour une même tension de cisaillement, la turbidité des eaux passe par exemple de 27 g/l pour une vase tassée depuis un jour et soumise à une tension de cisaillement de 0,3 N/m² à 10 g/l pour une vase tassée depuis deux jours et 2,5 g/l pour une vase tassée depuis un jour.
- La remise en suspension croît rapidement en fonction de la tension de cisaillement, la turbidité des eaux passant par exemple de 2 g/l pour une tension de 0,1 N/m² à 13 g/l pour une tension de 0,2 N/m² et à 28 g/l pour une tension de 0,3 N/m².
- La salinité des eaux aurait une grande influence sur la remise en suspension des vases du Mississippi (*figure 16.C*). Pour une même valeur de temps de tassement et une même tension de cisaillement, le débit solide remanié varierait dans un rapport de 1 à 35 lorsque l'on passe de l'eau douce à l'eau de mer.

Il n'est pas possible d'aller plus loin dans l'exploitation de cette étude et dans la comparaison avec les essais effectués en canal par le LCHF, les conditions expérimentales étant trop différentes et aucune indication n'étant donnée dans l'étude de Y.P. SHENG sur les propriétés rhéologiques des vases étudiées.

Précisons que d'autres auteurs (*réf. 19 - 20 - 21*) se sont penchés sur les problèmes de remise en suspension et de transport des vases sous l'action des courants mais les résultats obtenus restent encore trop sommaires et très loin des conditions naturelles pour que l'on puisse proposer des lois précises susceptibles d'aborder ces problèmes avec toute la précision désirable.

* *
*

CONCLUSIONS

-.-.-.-

Les recherches effectuées en canal par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF), pour le compte d'IFREMER (CNEXO - COB), n'avaient pas la prétention, compte tenu des faibles crédits disponibles pour cette étude, de résoudre le problème du débit solide d'entraînement des vases par les courants mais d'apporter des éléments permettant d'attirer l'attention sur les paramètres susceptibles d'intervenir dans de tels phénomènes.

L'importance de la connaissance des propriétés physiques et chimiques des vases, et notamment de leurs propriétés rhéologiques, a pu être confirmée au cours de ces essais.

Les résultats obtenus indiquent également que le débit solide unitaire croît en fonction de $(\tau_0 - \tau_c)$, différence entre la tension de cisaillement exercée par l'eau sur les fonds et la tension critique d'érosion d'une vase de rigidité τ_y connue, suivant une loi supérieure à la simple proportionnalité qui est généralement admise.

Dans le cas des vases de Loire, tamisées à 40 microns et dépourvues de matières organiques, le débit solide par mètre de surface sous l'action d'un courant d'eau pure serait donné par une expression de la forme :

$$Q_s \text{ (g m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{)} = \frac{1000}{3} (\tau_0 - \tau_c)^{3/2}$$

Pour les vases sableuses de Jakarta l'expression serait plus complexe mais dans tous les cas la simple proportionnalité entre Q_s et $(\tau_0 - \tau_c)$ ne permet pas de généraliser le transport, la rigidité initiale des dépôts restant un terme prépondérant pour ce phénomène.

Des recherches plus importantes seraient nécessaires pour préciser les lois de transport solide sous l'action de courants uniformes et les extrapoler aux mouvements sédimentaires dans les estuaires sous l'action de courants alternatifs.

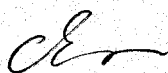
On constate cependant, en rapprochant les résultats obtenus au cours de cette étude sur les vases de la Loire aux recherches antérieures que le LCHF avait été amené à faire sur les transports sédimentaires dans les estuaires (*réf. 6 - 7 et 22*) que les ordres de grandeur des quantités de vases remises en suspension et transportées dans les estuaires peuvent être abordés avec une bonne approximation.

C'est en essayant de s'appuyer sur de telles études, en examinant avec soin les consolidations des vases au cours de leur tassement pendant les étales de marées ou au cours des marées de mortes eaux, en exprimant les caractéristiques des dépôts par leur rigidité initiale et en effectuant une étude assez fine des fluctuations des tensions de cisaillement exercées par l'eau sur les fonds que l'on doit pouvoir aborder le problème des transports sédimentaires dans les estuaires.

Espérons que cette étude, qui déborde largement par le travail qu'elle représente le montant des prestations envisagées au marché, sera un élément supplémentaire permettant de faire avancer les connaissances dans la dynamique des vases et d'établir des bases de recherches plus poussées dans ce domaine grâce à une étroite collaboration entre IFREMER et le LCHF.

Maisons-Alfort, Novembre 1984

L'Ingénieur chargé de l'étude



C. ESCURIER

*Le Directeur des Etudes
de Sédimentologie*



C. MIGNIOT

BIBLIOGRAPHIE - RÉFÉRENCES

- | | | |
|--------------------|--------------------------------|---|
| <i>Référence</i> 1 | C. MIGNIOT | <i>Etude de l'érosion par les courants de dépôts de vases</i>
CR Académie des Sciences PARIS 1965 |
| <i>Référence</i> 2 | C. MIGNIOT | <i>Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous les actions hydrodynamiques</i>
Houille Blanche n° 7/1968 |
| <i>Référence</i> 3 | J. VALEBOIS et
C. MIGNIOT | <i>Rejets des produits de dragages à l'aval d'un barrage sur l'Oued Hamiz</i>
SHF - Houille Blanche n° 2 - 3 - 1975 |
| <i>Référence</i> 4 | LCHF - C. MIGNIOT | <i>Représentation sur modèle réduit du mouvement des limons et autres sédiments très fins dans les estuaires soumis à la marée</i>
Rapport pour Direction des Ports et des Voies Navigables - Décembre 1962 |
| <i>Référence</i> 5 | LCHF - C. MIGNIOT | <i>Etude des sédiments pélitiques - Actions hydrodynamiques - Comportement des sédiments dans les estuaires</i>
Rapport pour le Ministère de l'Industrie Fonds de Développement Economique et Social - Novembre 1963 |
| <i>Référence</i> 6 | C. MIGNIOT et
B. BELLESSORT | <i>Etude comparative des mouvements sédimentaires dans quelques estuaires</i>
Houille Blanche n° 8 - 1972 |
| <i>Référence</i> 7 | C. MIGNIOT | <i>Dynamique sédimentaire estuarienne</i>
Matériaux cohésifs et non cohésifs
Revue Oceanis Vol. 6 Fasc. 4 - 1980 |

- Référence 8 S. PRADOTO *Influence des actions hydrodynamiques sur la remise en suspension des matériaux fins*
Problèmes posés par les littoraux d'Indonésie
 Thèse de Docteur-Ingénieur - Université PARIS-SUD - Orsay Octobre 1984
- Référence 9 E. PARTHENIADES *Mécanisme de mise en suspension "River mechanics" HW SHEN ES*
 Chapitres 25 et 26 - 1971
- Référence 10 C. PERIGAUD *Mécanique de l'érosion des vases*
Houille Blanche n° 7 et 8 de 1983
- Référence 11 G. GUST et E. WALGER *Influence des sédiments cohésifs en suspension sur la structure de la couche limite et l'activité érosive d'un écoulement marin turbulent*
Marine Geology - 22 (1976) pages 189-206
- Référence 12 P. CORMAULT *Détermination expérimentale du débit solide d'érosion de sédiments fins cohésifs*
 AIRH - D2 - pages 1 à 8 - 1971
- Référence 13 J.W. KAMPHUIS et K.R. HALL *Cohesive material erosion by unidirectional current*
 Janvier 1983
Journal of Hydraulic Engineering
 Vol. 109 n° 1 ASCE
- Référence 14 C. MIGNIOT *Erosion et sédimentation en mer et en rivière (page 644)*
La pratique des sols et des fondations
 G. FILLAT - Edit. Moniteur PARIS 1981
- Référence 15 H.A. EINSTEIN et R.B. KRONE *Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water*
Journal of Geophysical Research
 Vol. 67 n° 4 - pages 1451-1464 - 1962
- Référence 16 N.W. OWEN *Erosion of estuarial muds*
Hydraulics Research Station
 Wallingford - 1972

- Référence 17 R. ARIATHURAI et
A.J. MEHTA *Fine sediments in waterway and harbor
shoaling process
Coastal Engineering - Columbo 1983
pages 1094-1108*
- Référence 18 Y.P. SHENG *Mathematical modeling of three-
dimensional coastal currents and
sediment dispersion
Coastal Flooding and Storm protection
program
Technical Report CERC 83-2
Septembre 1983*
- Référence 19 E. ALLERSMA *Mud in estuaries and along coasts
International Symposium on river
sedimentation
Beiging - China - ma. 1980*
- Référence 20 P.D. SCARLATOS *On the numerical modeling of cohesive
sediment transport
Journal of Hydraulic Research n° 19
(1981) - pages 61 - 68*
- Référence 21 D.J. WILLIAMS et
A.E. JAMES *Flow behavior of cohesive suspension
University College Swansea - 1979*
- Référence 22 C. MIGNIOT *Les matières en suspension dans les
estuaires
Bulletin n° 28 de l'Association
Internationale de Géologie de
l'Ingénieur - 1983*