

# ETUDE DE LA VITESSE DE CHUTE DES COQUILLES DE FORAMINIFERES PLANCTONIQUES DANS UN FLUIDE COMPARATIVEMENT A CELLE DES GRAINS DE QUARTZ

par Léopold BERTHOIS et Yolande LE CALVEZ

L'examen de sédiments marins renfermant des Foraminifères planctoniques inclus dans des sédiments assez fortement siliceux nous a incités à faire une étude comparative de leurs vitesses de chute respectives.

Nous avons pris comme base de comparaison les déterminations faites par R. DURAND et G. COHEN DE LARA (1953) et nous avons adopté le même mode de calcul que dans une récente note sur la vitesse de chute des grains de maërl (L. BERTHOIS et A. GUILCHER, 1959). Nous ferons donc de très nombreux emprunts à ces deux études. Pour permettre la comparaison avec les données acquises pour le quartz nous avons fait une première série de vitesses de chute en eau douce. Nous avons ensuite fait de nouvelles mesures en eau salée.

## PRINCIPE DU CALCUL.

La vitesse de chute limite d'un grain de sable isolé en eau calme est atteinte lorsque son poids apparent est égal à la résistance hydrodynamique résultant du mouvement relatif qui est représenté par sa traînée « T ».

$$(1) \text{ On a : } T = C_x \rho S W^2 / 2$$

dans cette formule :  $\rho$  = masse spécifique du fluide  
 $S$  = maître couple du grain dans la direction du mouvement  
 $W$  = vitesse limite de chute  
 $C_x$  = coefficient de traînée (nombre sans dimension)

Pour une sphère de masse spécifique  $\rho'$  et de diamètre  $d$  l'équilibre des forces en régime d'équilibre peut s'exprimer par :

$$(2) \quad \pi d^3 / 6 (\rho' - \rho) g = C_x \rho S W^2 / 2$$

Si nous connaissons  $d$ ,  $\rho$  et  $\rho'$  la mesure de  $W$  permet de déterminer la valeur du coefficient de traînée  $C_x$  qui se présente comme une fonction du nombre de Reynolds.

$$(3) \quad Re = Wd/v$$

$v$  = viscosité cinématique de l'eau.

Lorsque le grain s'écarte de la forme sphérique, sa vitesse de chute devient différente de celle de la sphère de même volume et de même densité. Le diamètre de cette sphère est le diamètre nominal «  $d_n$  ». C'est aussi le diamètre de la sphère ayant même poids et même densité que le grain.

Les essais de MC NOWN (in R. DURAND et G. COHEN DE LARA, 1953) ont montré que les modalités de chute des grains tombant en chute libre pouvaient être reliées à la valeur correspondante du nombre de Reynolds (Re).

Pour  $Re < 0,1$  le grain conserve son orientation initiale.

Pour  $0,1 < Re < 300$  le grain s'oriente suivant son maître couple.

Pour  $Re > 300$  le grain oscille autour de sa position d'équilibre et tombe en feuille morte.

De l'équation (2) nous pouvons déduire le coefficient de traînée  $C_x$ .

$$(4) \quad C_x = 1/3 [(g' - g) g \pi dn^3 / \rho S W^2]$$

$dn$  = diamètre nominal (défini plus haut)

Le nombre de Reynolds sera alors donné par :

$$(5) \quad Re = Wdn/\nu$$

#### COEFFICIENT DE FORME.

Si en utilisant les mêmes grains, le maître couple n'avait pas été mesuré, nous n'aurions pu définir qu'un coefficient de traînée fictif d'une sphère  $C_{x_0}$  en utilisant la relation suivante :

$$(6) \quad (g' - g) g \pi dn^3 / 6 = (C_{x_0} \rho \pi dn^2 / 4) W^2 / 2$$

repreons l'équation (2) dans laquelle figure le maître couple « S », en divisant membre à membre, on obtient :

$$C_x / C_{x_0} = (\pi dn^2 / 4) / S = \psi$$

$\psi$  représente donc le rapport de la section droite de la sphère de même poids et de même densité à la section droite maximum (ou maître couple) du grain.

#### DETERMINATIONS EXPERIMENTALES.

Le principe des calculs étant posé, nous remarquerons que, pour résoudre l'équation (4) nous devons déterminer expérimentalement les données suivantes :

$$\begin{array}{ll} g' = \text{masse spécifique ou densité du matériau} & S = \text{maître couple maximum} \\ dn = \text{diamètre nominal} & W = \text{vitesse de chute.} \end{array}$$

#### 1° Diamètre nominal.

Le calcul du diamètre nominal «  $dn$  » nécessite la connaissance de deux éléments : a) le poids moyen d'un grain, b) la densité moyenne.

Nous avons fait deux déterminations du poids moyen d'un grain, l'une sur les très gros Foraminifères, l'autre sur les petits.

Les très gros Foraminifères planctoniques (*Orbulina universa* D'ORBIGNY) sont assez rares et nous n'avons pu en réunir que 45 pour la détermination du poids moyen d'un grain.

Les petits Foraminifères planctoniques sont plus abondants (*Globigerina bulloides* D'ORBIGNY) et nous disposons de 306 grains pour la même mesure.

Les pesées doivent être exécutées sur une balance de précision dans un récipient aussi léger que possible (petit verre de montre très mince) dont on étudie préalablement la courbe de refroidissement au sortir de l'étuve électrique pour déterminer la période de temps favorable à une pesée exacte.

Le poids total des grains est seulement d'une dizaine de milligrammes, il est indispensable de prendre d'importantes précautions pendant les pesées et de les réitérer plusieurs fois après remise à l'étuve pendant au moins six heures en prenant la précaution de recompter chaque fois les grains à peser :

le poids moyen d'un gros Foraminifère est de 0,000149 gr ;

le poids moyen d'un petit Foraminifère est de 0,000036 274 gr .

La détermination de la densité est beaucoup plus délicate que celle du poids moyen, par suite de la faible différence de poids à mesurer par rapport à la masse importante du picnomètre, qui devra être choisi aussi petit que possible.

Mais, par suite de la forme globuleuse des Foraminifères étudiés il est indispensable de faire le vide avant l'introduction du liquide et par conséquent l'exiguité du picnomètre est limitée par la nécessité d'avoir un goulot suffisant pour le passage de deux petits ajutages.

Malgré toutes les précautions prises il est quasi-impossible d'avoir la certitude absolue que la détermination de la densité n'est pas entachée d'une erreur importante due, par exemple, à la persistance de quelques petites bulles d'air à l'intérieur des coquilles de Foraminifères.

La mesure au picnomètre a donné PS : 1,155. Nous avons vérifié cette densité par le calcul en utilisant le temps de chute moyen et le diamètre moyen mesuré au micromètre oculaire.

Nous avons utilisé la formule de Stokes :

$$t = 30.581 h \times (\eta/D_p - D_l) \times (1/d^2)$$

de laquelle on tire :

$$D_p = (30.581/td^2) (h\eta) + D_l$$

dans laquelle :

- $D_p$  = densité des Foraminifères
- $D_l$  = densité du liquide = 1 000
- $\eta$  = viscosité du liquide à la température de l'expérience en poises : à 19°,8 = 0,0102
- $h$  = hauteur de chute en cm = 50.
- $t$  = temps de chute en minute : 10'' = 0',167
- $d$  = diamètre moyen en microns : 735

Le calcul donne pour valeur de  $D_p = 1,169$ . Ce résultat est assez voisin de la mesure directe pour en confirmer l'ordre de grandeur, mais il est impossible de savoir avec certitude à quel résultat nous devons donner la préférence, c'est pourquoi, en définitive, nous avons adopté une valeur moyenne entre l'expérience directe et le calcul d'après les mesures effectuées : soit PS = 1,162.

Nous avons obtenu les résultats suivants dans le calcul du diamètre nominal (tabl. 1).

TABLEAU I

	gros Foraminifères	petits Foraminifères
Poids/densité .....	0,000149/1,162	0,000036274/1,162
Volume .....	0,000 128 cm <sup>3</sup>	0,000031217 cm <sup>3</sup>
Diamètre de la sphère $d_n = \sqrt[3]{\frac{v \cdot 6}{\pi}}$ .....	0,625 mm	0,392 mm

*Comparaison avec les mesures directes.*

Nous avons choisi parmi les gros Foraminifères ceux qui ont la forme subsphérique ; leurs diamètres mesurés au microscope s'échelonnent entre 0,554 et 0,824 mm avec une valeur moyenne arithmétique du diamètre de 0,720 mm. Les petits Foraminifères sont beaucoup plus irréguliers (fig. 1<sup>b</sup> représentant les maîtres couples). Le diamètre moyen calculé d'après la surface du maître couple est :  $d = \sqrt[2]{\frac{4s}{\pi}} = \sqrt[2]{0.125\ 388 \times 4/3.1416} = 0,398$  mm  
cette valeur est très voisine de celle du diamètre nominal calculé plus haut.

**2° Maître couple maximum.**

Nous avons adopté la même méthode de mesure pour les deux tailles de Foraminifères. Une mince couche d'eau est étendue sur une lame de verre, où les Foraminifères sont déposés à l'aide d'un pinceau ou d'une aiguille montée. L'évaporation de l'eau suffit à les immobiliser pendant la

durée de l'observation. Le contour est dessiné à la chambre claire ou à l'aide d'un oculaire carroyé, la longueur et la largeur totale sont mesurées au micromètre oculaire. Enfin les surfaces sont soigneusement planimétrées.

Le coefficient d'agrandissement peut être calculé d'après les mesures faites au micromètre oculaire, mais il est plus rapide de déterminer la valeur d'une division du vernier du planimètre en dessinant une figure géométrique simple à l'échelle de l'agrandissement et en planimétrant cette surface. Le coefficient de vernier ainsi déterminé était de  $0,00404 \text{ mm}^2$ .

Nous avons obtenu les valeurs suivantes pour les maîtres couples :  
 gros Foraminifères =  $0,431 \text{ mm}^2$ , petits Foraminifères =  $0,125388 \text{ mm}^2$ .

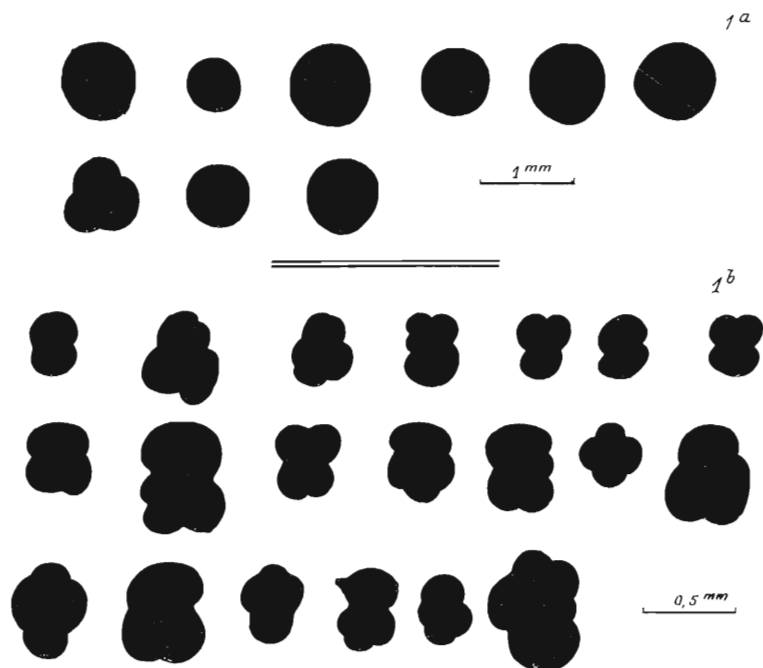


FIG. 1. — 1<sup>a</sup> Maîtres couples des gros Foraminifères planctoniques.  
 1<sup>b</sup> Maîtres couples des petits Foraminifères planctoniques.

### 3° Mesure des vitesses de chute.

a) *Dans l'eau distillée.* Nous avons d'abord mesuré les vitesses de chute en eau distillée, pour permettre une comparaison valable avec celles obtenues pour le quartz d'après les recherches de BUDRYK, RITTINGER, STOKES (1851), RUBEY (1933), WADELL (1934-1936).

Les mesures sont faites dans un tube de verre de 52 mm de diamètre entre deux repères espacés de 500 mm. La principale difficulté à surmonter est de pouvoir suivre la descente des objets qui sont très petits, nous l'avons résolue en adoptant un dispositif inspiré de ceux qui sont couramment employés dans les instituts océanographiques pour l'éclairage des burettes de Knudsen et en l'équipant de deux tubes fluorescents. La seule précaution à prendre consiste à interrompre périodiquement les mesures pour ne pas provoquer un trop fort échauffement du liquide, ce qui modifierait son coefficient de viscosité.

Les Foraminifères sont déposés un par un à la surface du liquide, en général la tension superficielle est suffisante pour s'opposer à la descente immédiate. Si au bout d'un certain temps le Foraminifère n'a pas coulé, il suffit de l'effleurer avec une aiguille montée pour provoquer la descente.

Les temps de chute sont très irréguliers, on observe même des valeurs très aberrantes mais elles n'excèdent pas 2 à 3 %. Pour en donner un exemple concret voici (tabl. 2) les temps mesurés pour une hauteur de chute de 500 mm (petits Foraminifères).

Nous avons écarté les mesures aberrantes qui résultent sans doute soit d'une minceur inaccoutumée de la coquille, soit de la présence d'une petite bulle d'air ayant échappé à l'observation au cours de la descente. La moyenne arithmétique de ces résultats donne une vitesse de chute de : 0,0184 m/sec. La vitesse de chute la plus fréquente est comprise entre 0,0247 m/sec. et 0,0203 m/sec. Nous avons, en définitive, adopté la valeur la plus probable qui est 0,0212 m/sec.

b) *Dans l'eau de mer.* La salinité a été dosée par  $\text{NO}_3\text{Ag}$  en présence de chromate de potassium. La moyenne de trois dosages est de 35,041 ‰. La densité de cette eau est de 1,026 à 20°C.

Le coefficient de viscosité déterminé d'après les mesures de YASUO MIYAKE et MASAMI KOIZUMI (1948) est de 0,0108 poises à 20°.

Les temps de chute sont un peu plus importants qu'en eau distillée (tabl. 3).

TABEAU 2

Temps de chute (sec.)	Nombre de mesures
14 à 20	19
20 à 25	37
25 à 30	20
30 à 35	14
35 à 40	3
40 à 45	2
45 à 50	2
70 à 95	3 <sup>(1)</sup>
	Total 100

(1) Mesures aberrantes.

TABEAU 3

Temps de chute (sec.)	Nombre de mesures
20 à 25	16
25 à 30	20
30 à 35	26
35 à 40	10
40 à 45	9
45 à 50	6
50 à 55	6
55 à 60	1
60 à 65	5
65 à 70	1
	Total 100

La plus faible vitesse observée est de 0,00732 m/sec. La plus forte est de 0,0247 m/sec. Moyenne arithmétique des vitesses : 0,0141 m/sec. Nous avons adopté la vitesse la plus probable (calculée) : 0,0154 m/sec.

*Vitesse de chute de la sphère équivalente de même densité.*

Dans la gamme dimensionnelle des objets étudiés la formule de Rittinger est applicable.

$$V = 87^2 \sqrt{(D_p - D_l) \overline{d_n}}$$

Nous avons obtenu les résultats suivants :

dans l'eau distillée : gros Foraminifères : 0,0276 m/sec, petits Foraminifères : 0,02175 m/sec ;  
dans l'eau de mer : petits Foraminifères : 0,02009 m/sec.

*Calcul du nombre de Reynolds (Re) et du coefficient de traînée (Cx).*

A l'aide des éléments déterminés expérimentalement suivant les méthodes exposées ci-dessus nous avons calculé les nombres de Reynolds (équation 5) et le coefficient de traînée Cx (équation 4) (tabl. 4).

Les points répondant à ces coordonnées ont été placés sur l'abaque donnant les valeurs des coefficients de traînée Cx des grains de quartz en fonction des nombres de Reynolds correspondants (fig. 2).

Dans le cas présent nous pouvons considérer que le coefficient de forme d'un Foraminifère  $C_x/C_{x_0} = \psi$  a pour valeur approximative la différence entre la valeur de l'ordonnée du Foraminifère et du grain de quartz ayant le même nombre de Reynolds que lui (fig. 2).

TABEAU 4

	Nombre de Reynolds (Re)	Coefficient de trainée (Cx)
Dans l'eau distillée .		
gros Foraminifères . . . . .	31,180	0,3768
petits Foraminifères . . . . .	8,358	1,801
Dans l'eau de mer à 35,041‰ :		
petits Foraminifères . . . . .	5.589	2,735

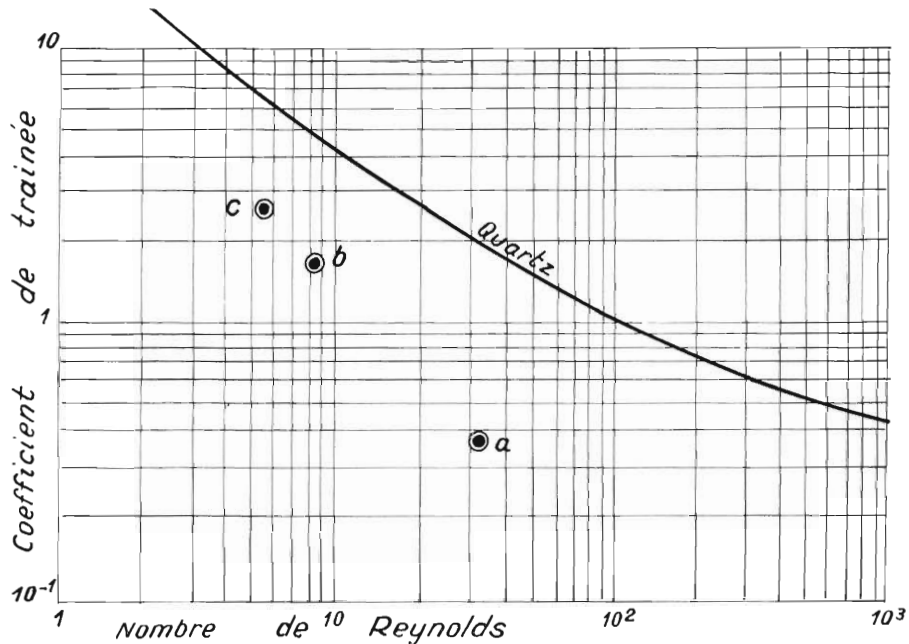


FIG. 2. — Coefficients de trainée en fonction du nombre de Reynolds. Courbe des coefficients de trainée du quartz d'après R. DURAND et COHEN DE LARA. a : gros Foraminifères. b : petits Foraminifères, dans l'eau distillée ; c : petits Foraminifères dans l'eau de mer à 35,04‰.

*Diamètres des grains de quartz ayant la même vitesse de chute.*

Nous avons reporté les caractéristiques hydrodynamiques des Foraminifères étudiés : diamètres et vitesse de chute en mm/sec., sur un abaque donnant les mêmes caractéristiques pour des particules de quartz dans l'eau à 20°C (fig. 3). On peut alors remarquer :

- 1° qu'un grain de quartz de 0,250 mm de diamètre se sédimente à la même vitesse qu'un Foraminifère de 0,625 mm de diamètre ;
- 2° qu'un grain de quartz de 0,210 mm de diamètre possède la même vitesse de chute qu'un Foraminifère de 0,392 mm de diamètre.

Calcul des vitesses de chute en eau profonde.

Lorsqu'un objet tombe de la surface vers les profondeurs océaniques sa vitesse de chute est modifiée par la variation du coefficient de viscosité de l'eau de mer et de la densité.

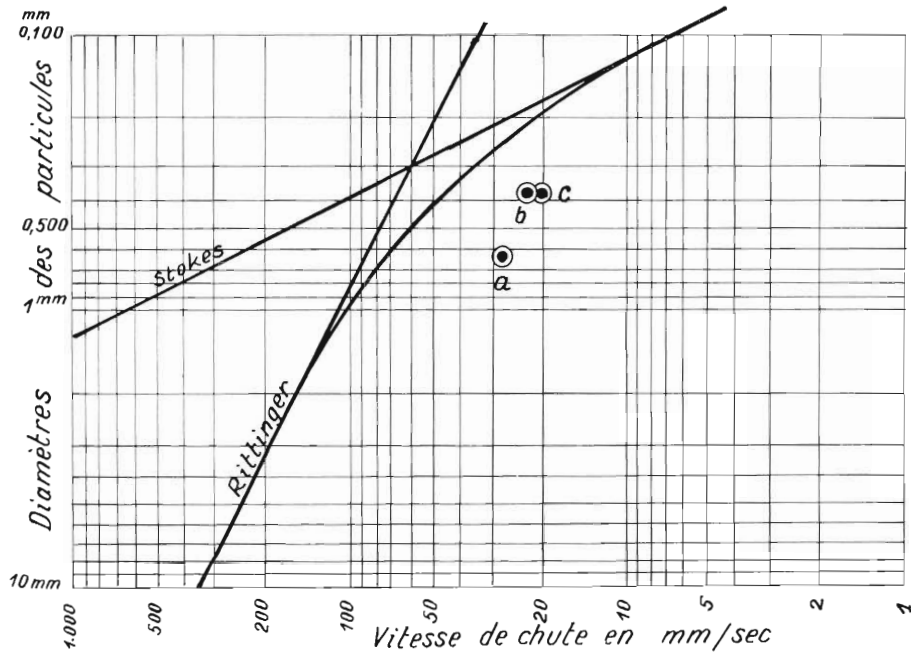


FIG. 3. — Courbes de vitesses de chute du quartz en fonction du diamètre des particules. a : gros Foraminifères, b : petits Foraminifères, dans l'eau distillée ; c : petits Foraminifères dans l'eau de mer à 35,04 ‰.

Pour notre calcul nous avons utilisé les résultats de la station n° S 2-15 de l'escorteur « Aventure » du 22 octobre 1958, position 49°38'N — 14°56'O (Cahiers océanographiques, février 1960).

La température de l'eau et la salinité (‰) permettent de trouver le coefficient de viscosité de l'eau d'après les mesures de YASUO MIJAKE et MASAMI KOIZUMI (1948). A l'aide du  $\sigma_t$  donné pour chaque prélèvement on peut calculer la densité de l'eau de mer :  $S_t = 1 + \sigma_t/1\,000$  (M. KNUDSEN, 1901).

Les données sont alors celles fournies dans le tableau 5.

TABLEAU 5

Profondeur (m)	Temp. (°C.)	Salinité (‰)	$\sigma_t$	Coefficient de viscosité ( $\eta$ )	Densité de l'eau de mer $S_t$
0	14°	35.53	26.61	0,0126	1,02661
100	12°1	35.64	27.09	0,0132	1,02709
1000	7°12	35.30	27.65	0,0152	1,02765
2000	3°58	35.09	27.93	0,0169	1,02793
3000	2°82	35.00	27.92	0,0172	1,02792
4000	2°54	34.95	27.90	0,0174	1,02790

Dans la gamme dimensionnelle des Foraminifères étudiés c'est la formule de Rittinger qui convient le mieux pour calculer la vitesse de chute. Ainsi dans l'eau distillée cette formule a conduit à une vitesse de chute de 0,02175 m/sec. qui est extrêmement voisine de la vitesse mesurée expérimentalement qui était de 0,0212 m/sec. Dans l'eau de mer, l'application de la même formule a donné une vitesse de 0,02009 m/sec., un peu inférieure à la précédente et s'intercalant correctement entre les valeurs externes observées.

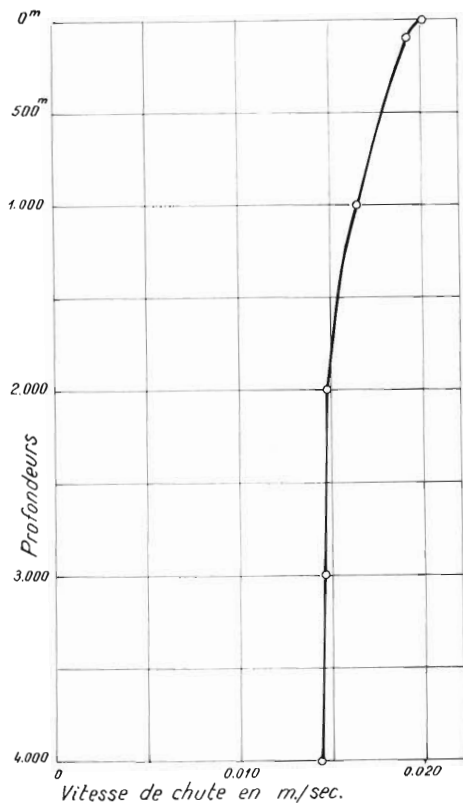


FIG. 4. — Vitesses de chute d'un Foraminifère planctonique en eau de mer. Caractéristiques hydrologiques de la station n° S 2-15 de l' « Aventure », 22 octobre 1958, 49° 38' N - 14° 56' O.

La formule de Rittinger tient compte de la densité du liquide mais ne renferme aucun terme représentant le coefficient de viscosité dont les variations sont ici beaucoup plus importantes que celles de la densité de l'eau de mer. L'emploi de la formule de Rittinger nous aurait donc conduits à des vitesses trop importantes pour les grandes profondeurs.

La formule de Stokes possède les facteurs correctifs nécessaires (densité et coefficient de viscosité) mais elle n'est pas applicable dans notre domaine dimensionnel pour le calcul des vitesses de chute. L'examen de la figure 3 montre que cette formule donnera des résultats trop élevés.

Pour rester dans l'ordre de grandeur des résultats expérimentaux obtenus pour les vitesses de chute nous avons d'abord calculé les vitesses successives, aux profondeurs indiquées dans le tableau 5, à l'aide de la formule de Stokes.

Nous avons obtenu six valeurs en ordre décroissant, de la surface à la profondeur de 4 000 m. Nous avons ensuite calculé les coefficients de réduction des cinq dernières valeurs par rapport à la première, prise comme unité. Enfin nous avons appliqué ces coefficients à la vitesse initiale de chute obtenue par la formule de Rittinger dont l'accord avec l'expérience est satisfaisant. Les résultats de ce calcul sont représentés sur la figure 4.

Le calcul que nous avons exécuté n'est pas rigoureux car dans le domaine dimensionnel qui nous était imposé par les dimensions des Foraminifères les formules habituelles de Stokes, Rittinger, Oseen et Budryk conduisent à des résultats assez discordants. Notre but était seulement d'attirer l'attention sur l'importance de la décroissance de la vitesse au cours d'une chute en eau profonde.

#### RESUME ET CONCLUSION

Nous avons montré que, pour une même valeur du nombre de Reynolds, un Foraminifère possède un coefficient de traînée très différent de celui du grain de quartz correspondant. Cette disparité, qui constitue ici le coefficient de forme :  $C_x/C_0 = \psi$ , montre qu'il existe une profonde divergence dans le comportement hydrodynamique de ces deux objets.



En comparant les diamètres des grains de quartz et des Foraminifères ayant la même vitesse de chute nous avons montré que les diamètres des particules minérales n'atteignaient qu'environ la moitié du diamètre des organismes.

Par conséquent, un sédiment marin à Foraminifères planctoniques dont les grains détritiques ont un diamètre inférieur à la moitié du diamètre des organismes, témoignera d'un dépôt normal, non remanié dont tous les éléments peuvent être contemporains.

Un sédiment dans lequel le diamètre des éléments détritiques atteindra la moitié de celui des Foraminifères planctoniques pourra avoir été remanié puisqu'un courant de même vitesse peut déplacer ensemble les grains minéraux et les éléments organiques.

Un sédiment contenant des Foraminifères planctoniques et des grains détritiques de diamètre égal ou supérieur aux premiers se sera constitué en deux périodes distinctes. Le dépôt organique sera postérieur au dépôt minéral.

Nous avons enfin montré la décroissance de la vitesse de chute en eau profonde des Foraminifères planctoniques.

#### BIBLIOGRAPHIE

- STOKES (G. G.), 1851. — On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulum. — *Trans. Camb. Philos. Sc.*, **9** (2) p. 8-106.
- RUBEY (W. W.), 1933. — Settling velocities of gravel, sand, and silt particles. — *An. Journ. Sc.*, **25**, p. 325-338.
- WADELL (H.), 1936. — Some new sedimentation formulas. — *Physics*, **5**, p. 281-291.
- WADELL (H.), 1936. — Some practical sedimentation formulas. — *Geol. Foren Forhändl.*, **58**, p. 397-408.
- YASUO MIYAKE et MAZAMI KOIZUMI, 1948. — The measurement of the viscosity coefficient of sea water. — *J. Mar. Res.*, **7** (2) p. 63-66.
- RÉSULTATS D'OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES, escorteur l'« Aventure ». — *Cahiers Océanogr., C.O.E.C.*, n° 2, fév. 1960, p. 138-139.
- KNUDSEN (M.), 1952. — Hydrographical Tables, Copenhagen, p. 4.
- BERTOIS (L.) et GUILCHER (A.), 1959. — Les bancs de Saint Marc et du Moulin Blanc (rade de Brest) et remarques sur la sédimentation du Maërl (*Lithothamnion calcareum*). — *Cahiers Oceanogr. C.O.C.E.*, **11** (1) p. 13-23.
- DURAND (R.) et COHEN de LARA (G.), 1953. — Vitesse de chute des grains de sable dans les fluides en milieu fini (Relation entre le coefficient de traînée et le coefficient de forme). — *La Houille Blanche*, **8** (2) p. 254-259.