

ÉTUDES ÉCOLOGIQUES SUR LES SABLES INTERCOTID AUX

I. - Questions de méthode granulométrique. Application à trois anses de la Baie de Quiberon.

par

Marcel Prenant

Laboratoire d'Anatomie et Histologie Comparées de la Faculté des Sciences de Paris
et Station Biologique de Roscoff

Résumé

Il est proposé, pour la représentation des résultats de l'analyse granulométrique, de porter en ordonnées les logarithmes des nombres de grains, calculés pour chaque fraction de tamisage en fonction d'hypothèses simples. La valeur des courbes ainsi obtenues est discutée ; les erreurs sont évaluées, et des corrections sont prévues au cas où elles seraient rendues nécessaires par une trop grande proportion de grains de densité et de forme aberrantes. Une première application est faite aux sables de trois anses abritées de la baie de Quiberon, à peu près dépourvues de vase et soumises presque uniquement aux mouvements de marée, sans turbulence notable. Les sables y sont exceptionnellement bien triés, et sériés selon le niveau de la station. La représentation adoptée, qui met en valeur les éléments fins, permet de conclure à leur dispersion désordonnée dans les espaces poraux d'une charpente structurale formée par les éléments grossiers. Les données numériques concordent avec l'hypothèse d'une disposition « cubique » de ces derniers. La saturation des espaces poraux par les éléments fins n'est atteinte que dans les parties les plus déclives. Bien que les trois anses aient des sables de granulométries identiques jusque dans l'extrême détail, l'une d'elles a une faune à Ophélies, très différente de celle des deux autres, à Phascolosomes et à Tapes. Sans doute faut-il invoquer d'autres facteurs écologiques que la granulométrie pour interpréter cette opposition.

INTRODUCTION

Ayant repris depuis 1955, dans la région de Roscoff, des recherches écologiques sur les sédiments sableux de la zone des marées, j'y ai recueilli des données granulométriques sur plusieurs centaines d'échantillons, et j'ai été mené à étudier les procédés d'interprétation et de représentation graphique les mieux adaptés aux besoins de l'écologie, besoins qui ne sont pas nécessairement identiques à ceux de la sédimentologie.

Quand je m'occupais d'écologie dans les sables de Quiberon (1932), puis de Douarnenez (1936-1939), j'avais songé déjà à préciser la technique de tamisage par laquelle Thoulet (1900) avait étu-

dié la « composition mécanique » de certains sédiments de dragages. Complétant et resserrant beaucoup l'échelle des tamis employés, et utilisant les représentations graphiques couramment appelées aujourd'hui courbes pondérales de fréquence (ou de dispersion) et courbes pondérales cumulatives, en abscisses logarithmiques, je m'étais trouvé, quelques mois après Wendtworth (1931) et indépendamment de lui, parmi les premiers à étudier la granulométrie des sédiments.

Près de trente ans après, on trouve que de grands progrès ont été réalisés sur le plan des techniques de tamisage, ainsi que de l'utilisation graphique et mathématique des résultats. Mais cette évolution s'est faite sous l'influence des sédimentologues seuls, qui ont mis au point des méthodes d'étude aussi diverses que raffinées. Les écologistes n'ont eu recours à ces méthodes qu'incidemment, un peu au hasard et sans adaptation propre : d'où l'utilité actuelle d'une révision de principe, faite du point de vue biologique, et sans aucune prétention à bouleverser les procédés normaux en sédimentologie.

La tentative présente sera centrée avant tout sur l'étude des sédiments sableux récoltés dans la zone des marées sur les côtes bretonnes. Ils ont été recueillis pour la plupart entre Saint-Michel-en-Grève et Morgat pendant les saisons d'été 1955 et suivantes. Mais j'ai repris aussi, avec les mêmes techniques, mes anciens échantillons, originaires des parages de Quiberon et de Douarnenez. Quelques sédiments, enfin, proviennent de Concarneau, du Mont-Saint-Michel, de Barneville, de Carteret, et même (à titre de comparaison) de Villefranche-sur-Mer, en Méditerranée : je suis heureux de remercier ici les collègues qui les ont recueillis pour moi avec grand soin. Le tout représente près d'un millier d'échantillons.

Il ne sera fait état ici que des sédiments sableux, dans des limites voisines de celles qui pour Bourcart (1959) comprennent les granules et les sables. Sont donc exclus de cette étude, d'une part les graviers et galets, et d'autre part les éléments très fins (poudres) constitutifs des boues et des vases. Ceux-ci, dont l'importance écologique est grande, n'ont été envisagés provisoirement que dans leur masse globale, telle que la sépare le tamisage sur mailles de 30 ou de 50 μ : tamisage au mouillé, ou même tamisage à sec pour des sables peu vaseux. On ne détaillera donc pas, dans ce mémoire, l'étude de cette phase fine par sédimentation à l'état défloculé, cette technique n'ayant été employée ici qu'exceptionnellement, à titre d'information accessoire. Quant aux graviers et galets, au-dessus de 3 ou 5 mm de diamètre, il a paru suffisant de les séparer en masse, sans tamisage de détail ni utilisation des procédés statistiques mis au point par Cailleux sur mesures individuelles directes.

Le fait que les sédiments étudiés sont tirés presque tous de la zone des marées, sur les côtes bretonnes aux innombrables découpures, impliquerait de toutes façons, pour un point donné, des conditions de dépôt très complexes et changeantes dans le régime des vagues et des courants. Mais il faut compter aussi avec l'instabilité des vents, avec les périodes de calme ou de tempêtes, et avec les variations météorologiques saisonnières. Malgré cette diversité qui pourrait être désespérante, malgré les brusques changements topographiques locaux qu'il n'est pas rare d'observer dans les grèves, l'écologiste note cependant une grande constance des biotopes et des biocoenoses en leur ensemble.

Dans une station ancienne comme Roscoff, l'observation directe permet de suivre depuis un demi-siècle (et la tradition depuis plus longtemps encore) cette stabilité générale, même si divers accidents la mettent en défaut çà et là. Il est donc fréquent, sur les côtes bretonnes, de voir des biocoenoses endogées durables, bien délimitées et bien distinctes, se juxtaposer à quelques mètres de distance, alors que les conditions hydrodynamiques moyennes semblent à la fois moins précises dans leur définition topographique et bien plus instables au cours des temps.

Les sédimentologues admettent avec raison, comme principe général, que, par sa granulométrie, un sédiment exprime, en l'intégrant, l'ensemble des actions hydrodynamiques qu'il a subies. Ils précisent cette notion en travaillant le plus souvent sur de vastes espaces, à conditions relativement uniformes, afin d'obtenir des lois et des paramètres mathématiques d'une simplicité plus ou moins abstraite. Pour l'écologiste, la granulométrie est l'une des propriétés du biotope sédimentaire, importante en ce qu'elle sert de substrat à bien d'autres conditions essentielles : porosité, air interstitiel, eau interstitielle avec sa composition propre, teneur en matières organiques, réaction ionique, état d'oxydo-réduction, oxygène libre, fermentations bactériennes, microflore et microfaune, etc. Elle résume en même temps, pour un biotope stable, les actions hydrodynamiques qui prédominent localement par leur répétition fréquente, plutôt que celles, plus spectaculaires, qui sont aussi plus exceptionnelles.

Les écologistes, en outre, n'ont généralement pas le choix du milieu sédimentaire à étudier : il leur est imposé par les animaux objets de leurs recherches.

Pour toutes ces raisons, ils seront attirés, de préférence, par des représentations granulométriques plus empiriques, mettant en jeu des grandeurs concrètes. Le contact avec celles-ci se recommande encore du fait que, dans la zone des marées, les conditions physiques de dépôt, d'ablation, de remaniement et d'équilibre des sédiments sont pour une grande part accessibles à une observation directe et minutieuse.

Dans ce qui suit, il ne s'agira guère que de granulométries. Pour éviter tout malentendu, il faut répéter que ce travail est une simple introduction à une recherche écologique plus complète. Le but poursuivi depuis six ans était de dresser, pour un ensemble de plages bretonnes, une sorte de canevas où pourraient s'inscrire ensuite les données physiques, chimiques et biologiques qui permettraient de définir localement des évolutions d'allure pédologique. L'esquisse de ce canevas, bien qu'encore très lacunaire, est assez avancée pour présenter dès à présent quelque utilité.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'appui de la Station biologique de Roscoff, et je remercie très vivement de leur aide sa direction et son personnel. C'est à son directeur, M. Georges Teissier, que je dois l'idée première de rechercher une représentation granulométrique en nombre de grains. J'ai tiré profit de l'expérience de MM. Claude Lévi, François Rullier, et Bertil Swedmark, en matière d'écologie des sables. Ma reconnaissance va aussi à MM. Bureau et Gostan qui, en 1955, ont effectué pour moi un grand nombre de tamisages.

I. - TECHNIQUES

A. - Prélèvement et traitement des échantillons avant tamisage

Puisque l'écologiste doit connaître les propriétés du sédiment à l'endroit même où vit l'espèce étudiée, et que sur les côtes bretonnes ces propriétés peuvent varier très vite d'un point à l'autre, nous avons exclu tout mélange de deux prélèvements, même très proches, et toute réalisation d'un échantillon moyen. Nous nous sommes interdit, d'autre part, de jamais partager un échantillon après qu'il avait perdu sa structure naturelle, pour ne pas risquer d'altérer sa composition.

Le lieu de prélèvement est choisi sur le terrain, soit en raison de la situation topographique, soit d'après l'aspect, soit pour la présence de certains animaux, etc. On y prélève à la bêche une motte de sédiment, sur une profondeur de 20 cm. environ. Une portion représentative de cette motte (la masse optima en sera discutée, p. 00) est récoltée, sans émiettement si possible, et rapportée dans un récipient clos. Si la motte a un aspect hétérogène (différent, par exemple, en surface et en profondeur), on peut y faire deux ou plusieurs prélèvements, à la double condition de respecter la structure naturelle de chacun d'eux et de ne pas les mélanger par la suite. Des notes explicites sont prises sur chaque échantillon. Pendant la durée d'une basse mer, compte tenu des notes à prendre et des déplacements, un opérateur isolé peut recueillir ainsi une trentaine d'échantillons. Si les points de récolte ont été bien placés sur le terrain, ils peuvent donner une idée assez complète d'une plage de dimensions moyennes. Mais dans ces conditions, l'opérateur isolé ne peut s'occuper sérieusement ni de la faune ni d'autres propriétés du sédiment.

Au laboratoire, l'échantillon est lavé trois fois sur filtre à l'eau douce, puis séché à l'étuve à poids constant. A partir du lavage surtout, il importe de ne pas le partager et de ne rien en perdre, puisque sa structure est totalement détruite. Notre étude laissant de côté, non seulement les vases liantes d'estuaires, mais aussi les sables nettement vaseux (par exemple, bien des sédiments d'herbiers), il n'a pas semblé utile de soumettre les échantillons à un traitement défloculant.

On ne leur a pas fait subir, non plus, la décalcification préalable souvent pratiquée en sédimentologie. Il ne s'agit pas, ici, de définir une histoire géologique pour laquelle la granulométrie des calcaires biogènes importe peu. Mais au contraire pour l'animal endogé un grain calcaire a même importance, en première approximation, qu'un grain de quartz, de feldspath, de mica ou de minéral lourd. Le premier tamisage doit donc trier le sédiment total, quitte à ce que la teneur en calcaire soit étudiée ensuite, soit globalement, soit de préférence par fraction de tamisage. Dans nos sables bretons, cette teneur peut varier largement (de 0 à 50 pour 100, environ), et peut être un facteur écologique de grande valeur.

B. - Technique des tamisages

Dans mes travaux granulométriques de 1932 à 1939, j'utilisais une série de dix-sept tamis en soie à bluter, dont j'ai donné les caractéristiques en 1932. Je tamisais à la main, et successivement pour les divers tamis. Je n'ai jamais renoncé, en ces dernières années, à me servir occasionnellement d'une série analogue et dans les mêmes conditions. Mais le travail de base, rapporté dans ce mémoire, a été fait à l'aide de colonnes de tamis de bronze ou laiton, secoués mécaniquement : à la Station Biologique de Roscoff, en 1955 et 1956, sur un appareil Hydrotechnica à secousses, avec une série de vingt-trois tamis dont les caractéristiques sont données dans le tableau I, colonne A (le même outillage a servi au travail de Rullier sur l'Aber de Roscoff) ; et à partir de 1957, soit à cette Station, soit au Laboratoire d'Anatomie Comparée de Paris, sur des appareils Rotolab, avec des séries de vingt-deux tamis Tripette et Renaud de type A.F. NOR. 1938, c'est-à-dire normalisés avec vides de mailles en progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$, soit 1,259, ou pratiquement 1,26. Les caractéristiques théoriques de ces séries sont données dans le même tableau, colonne B, et celles de la série de soies à bluter le sont dans la colonne C. Les avantages pratiques des colonnes de tamis métalliques, secoués mécaniquement, sont bien évidents. Evitant les lenteurs et les fatigues du travail à la main sur soies à bluter, cet appareillage doit être utilisé pour les recherches de grande série, maintenant que l'on en dispose. On ne peut se dissimuler, cependant, qu'il est peut-être moins adapté aux études de précision, pour deux motifs.

Un des problèmes techniques du tamisage concerne la durée de celui-ci. Cette durée doit permettre que viennent au contact d'un tamis donné, en position convenable, tous les grains qui peuvent le traverser ; et pourtant, elle ne doit pas être exagérée, sans quoi l'on risque de briser inutilement certains grains fragiles. Or, avec une colonne de tamis, secoués mécaniquement, en bloc et de façon aveugle, on applique la même durée à des portions de tamisage de masses très inégales, qui exigeraient des temps d'autant plus différents que les portions les plus importantes sont faites souvent de sables fins, arrêtés par des tamis de surface tamisante (somme des superficies vides des mailles) relativement faible. Au contraire, en opérant à la main, de façon moins brutale ménageant mieux l'intégrité des grains, et en agissant isolément sur les tamis successifs, on peut suivre le sort de chaque portion et arrêter l'opération au moment opportun, c'est-à-dire quand on juge négligeable le nombre de grains qui passent encore (1).

Un autre problème technique bien connu est celui du décrassage intégral des tamis, où des grains voisins du diamètre limite restent toujours pris dans les mailles, pour les tamis fins surtout, et peuvent difficilement être dégagés. Un décrassage trop poussé serait très long et risquerait d'amener la rupture ou la déformation des

(1) SOURIE (1957) a peut-être donné à ce problème une solution meilleure en commençant le tamisage mécaniquement pendant un temps court, et l'achevant à la main, tamis par tamis.

fil fins et la détérioration du tamis. Bien des auteurs recommandent donc de nettoyer les tamis avec modération, mais selon un procédé constant. Ils admettent qu'ainsi le nombre de grains retenus ne varie pas, ce qui n'a chance d'être vrai que si les sables tamisés successivement diffèrent peu les uns des autres. Avec les soies à bluter, dont les mailles sont fragiles aussi, mais plus souples, il est plus

TABLEAU I
MAILLES DES TROIS SÉRIES DE TAMIS UTILISÉES

A. - Tamis métalliques Hydrotechnica			B. - Tamis métalliques Tripette et Renaud (voisins de la série A.F.NOR.)					C. - Soies à bluter Tripette et Renaud		
N ^o des tamis	Vides de mailles en cm.	Loga- rithmes des vides	N ^o des tamis	Vides de mailles théo- riques en cm.	Loga- rithmes des vides théo- riques	Vides de mailles corrigés	Rapport $\frac{d_1}{d_2}$ des vides corrigés	N ^o des soies	Vides de mailles en cm.	Loga- rithmes des vides de mailles
8	0,3000	$\overline{1,477}$	38	0,5000	$\overline{1,699}$	0,4930		14	0,1610	$\overline{1,207}$
10	0,2000	$\overline{1,301}$	37	0,4000	$\overline{1,602}$	0,3730	1,32	20	0,1020	$\overline{1,009}$
12	0,1700	$\overline{1,230}$	36	0,3150	$\overline{1,500}$	0,3170	1,18	30	0,0690	$\overline{2,839}$
14	0,1500	$\overline{1,176}$	35	0,2500	$\overline{1,398}$	0,2430	1,30	40	0,0460	$\overline{2,663}$
18	0,1240	$\overline{1,093}$	34	0,2000	$\overline{1,301}$	0,1910	1,27	50	0,0370	$\overline{2,568}$
20	0,1060	$\overline{1,025}$	33	0,1600	$\overline{1,204}$	0,1620	1,18	60	0,0290	$\overline{2,462}$
25	0,0780	$\overline{2,898}$	32	0,1250	$\overline{1,097}$	0,1260	1,29	70	0,0280	$\overline{2,447}$
30	0,0600	$\overline{2,778}$	31	0,1000	$\overline{1,000}$	0,0990	1,27	80	0,0220	$\overline{2,342}$
35	0,0510	$\overline{2,708}$	30	0,0800	$\overline{2,903}$	0,0810	1,22	90	0,0210	$\overline{2,322}$
40	0,0450	$\overline{2,653}$	29	0,0630	$\overline{2,799}$	0,0610	1,33	100	0,0180	$\overline{2,255}$
50	0,0375	$\overline{2,574}$	28	0,0500	$\overline{2,699}$	0,0510	1,20	110	0,0150	$\overline{2,176}$
60	0,0300	$\overline{2,477}$	27	0,0400	$\overline{2,602}$	0,0400	1,275	120	0,0130	$\overline{2,114}$
70	0,0247	$\overline{2,393}$	26	0,0315	$\overline{2,500}$	0,0317	1,26	130	0,0110	$\overline{2,041}$
80	0,0225	$\overline{2,352}$	25	0,0250	$\overline{2,398}$	0,0247	1,28	140	0,0100	$\overline{2,000}$
90	0,0198	$\overline{2,297}$	24	0,0200	$\overline{2,301}$	0,0208	1,19	150	0,0090	$\overline{3,954}$
100	0,0180	$\overline{2,255}$	23	0,0160	$\overline{2,204}$	0,0161	1,29	180	0,0080	$\overline{3,903}$
110	0,0158	$\overline{2,199}$	22	0,0125	$\overline{2,097}$	0,0125	1,29	190	0,0070	$\overline{3,845}$
120	0,0146	$\overline{2,164}$	21	0,0100	$\overline{2,000}$	0,0096	1,30	200	0,0065	$\overline{3,813}$
130	0,0116	$\overline{2,064}$	20	0,0080	$\overline{3,903}$	0,0079	1,22			
180	0,0097	$\overline{3,996}$	19	0,0063	$\overline{3,799}$	0,0071	1,21			
250	0,0070	$\overline{3,857}$	18	0,0050	$\overline{3,699}$	0,0044	1,61			
300	0,0050	$\overline{3,716}$	17	0,0040	$\overline{3,602}$	0,0039	1,13			
350	0,0030	$\overline{3,585}$								

facile de récupérer intégralement les grains et d'améliorer par conséquent la précision. Pour le travail courant, les tamis métalliques restent néanmoins plus pratiques, mais il ne faut pas oublier que leur encrassage par les grains peut causer des erreurs particulièrement graves quand sur un tamis donné la portion de sédiment retenue est beaucoup plus faible que celle retenue au tamisage précédent.

D'un point de vue différent, on peut discuter les avantages des séries de tamis à mailles variant en progression géométrique, sur d'au-

tres séries, comme notre série Hydrotechnica. La série A.F. NOR. (Association Française de Normalisation) fournit théoriquement des données bien plus faciles à interpréter et à représenter graphiquement, évitant des corrections fastidieuses et parfois incertaines. Mais la réalisation pratique à l'aide des toiles métalliques commerciales courantes ne répond pas exactement aux exigences théoriques. On trouvera dans le tableau I, d'après les indications de la maison Tripette et Renaud elle-même, la comparaison des mailles réelles moyennes des tamis construits par cette maison avec les mailles théoriques A.F. NOR. : l'écart est souvent sensible et parfois important, surtout pour les mailles fines, et le rapport des vides de mailles pour deux tamis consécutifs varie de 1,11 à 1,61, autour de la moyenne théorique 1,26. Certains écarts, négligeables en première approximation, altèrent sensiblement la forme des courbes lorsqu'on recherche une précision moyenne, comme il arrive dans ce travail, et l'on se trouve ramené à la nécessité de corrections qui compliquent légèrement la traduction graphique.

Un inconvénient des séries régulières de tamis est aussi l'espace-ment de ces derniers, qui n'est pas exactement adapté aux besoins. Nous verrons que la portion de l'échelle écologiquement intéressante est comprise surtout entre 50 et 500 μ , et que dans cet intervalle, il faudrait disposer de tamis nombreux. Ils sont au nombre de onze (extrémités de l'intervalle comprises) pour la série A.F. NOR. (de raison 1,26), de quatorze pour la série américaine Tyler, souvent utilisée (de raison $\sqrt{2}$ ou 1,42), de quatorze aussi pour la série Hydrotechnica et pour notre série de soies à bluter. Dans le détail, ils se répartissent ainsi :

	Série A.F.NOR.	Série Tyler	Série Hydrotechnica	Soies à bluter
500 à 300 μ	3	3	3	2
300 à 115 μ	4	6	7	6
115 à 50 μ	4	5	4	6

Nous verrons que dans l'intervalle, 300 à 115 μ , se poseront des problèmes pour lesquels il serait utile d'avoir une échelle de tamis à la fois dense et régulière. Des quatre séries envisagées ici, celle de Hydrotechnica est la plus dense dans cet intervalle, mais elle n'a pas de régularité. La série A.F.NOR est la plus désavantageuse des quatre au point de vue de sa densité. Il serait très désirable de disposer de la série A.F.NOR. de raison $\sqrt[3]{10}$, ou de la série Tyler de raison $\sqrt{2}$, dont on assure qu'elles sont en projet, mais dont la réalisation est sans doute gênée par la difficulté technique de sauvegarder une régularité qui fait leur mérite.

Nous concluons qu'une série de tamis à ouvertures de mailles en progression géométrique n'est pas une panacée. Il ne peut y avoir que des avantages à l'employer concurremment avec une autre ou même d'autres comme nous l'avons fait. En utilisant des séries différentes pour un même sédiment, et inversement tamisant de nombreux sédiments sur une même série, on se rend compte des accidents qui dans les courbes tiennent à un tamis défectueux ou au mauvais jaugeage de sa maille moyenne, et l'on peut effectuer les rectifications ou corrections correspondantes. De toutes façons, il ne

faut pas oublier que la série de tamis imposera aux courbes une certaine déformation, due à sa discontinuité, et que les discontinuités étant différentes pour deux séries non standardisées, les courbes obtenues avec ces séries pour un même sédiment devront être voisines, mais ne se superposeront pas. Quelle qu'elle soit, la courbe ne traduit le sédiment que « vu » à travers le système de tamisage. Si bon que soit celui-ci, il n'est jamais désavantageux de comparer ses résultats à ceux d'autres appareils, bien étudiés aussi. Il serait même utile de les comparer à ceux d'un système de tri continu, comme le serait par exemple un tri par vitesse de sédimentation.

Il faut discuter encore quelques points techniques, d'ailleurs liés entre eux : la masse convenable à choisir pour l'échantillon ; la durée optima du tamisage ; la précision à donner aux pesées (1).

On définit un tamis par son vide de maille moyenne, obtenu en mesurant au hasard de nombreuses mailles et prenant la moyenne. Mais cette quantité est assez abstraite, par rapport au tamisage lui-même : si bien construit que soit le tamis, les mailles ont des dimensions quelque peu inégales, et leur forme n'est pas toujours rigoureusement carrée, surtout sur les bords. Si l'on pousse le tamisage jusqu'au bout, c'est la plus grande maille qui laissera passer le dernier grain ; et celui-ci a peu de chances de s'y présenter si la masse retenue sur le tamis est grande. De ce point de vue, il serait avantageux de réduire la masse totale de l'échantillon. Mais d'autre part, celui-ci ne doit pas être trop petit, pour rester représentatif et pour accroître la précision relative des pesées pour les petites fractions du tamisage. Wendtworth a posé comme règle que, pour des sables, il ne devait pas être inférieur à 125 g. Biéttlot (1941) a donné une formule empirique qui, appliquée à nos sédiments, donnerait des limites voisines de 75 g. et 175 g. En fait, dans presque tous les cas, je me suis tenu à ces ordres de grandeur, et la masse de mes échantillons secs était presque toujours comprise entre 60 g. et 120 g. ; mais elle a parfois débordé ces limites, d'un côté jusque vers 30 g. en des cas exceptionnels et aberrants (sables en flottaison par exemple), et de l'autre jusque vers 300 g. Quand j'ai comparé pour un même sédiment des tamisages de masses très différentes, je n'ai jamais eu d'écarts importants.

Pour la durée de tamisage, il a été dit déjà (p. 299) combien il était difficile de la fixer exactement quand on secoue mécaniquement des colonnes de tamis. Des expériences que j'ai faites systématiquement sur des sédiments différents tamisés et retamisés, chacun pendant des temps variant de 15 minutes à 2 heures, ont montré peu d'écarts pour un échantillon donné, à partir d'une durée minimum qui dépend surtout de la masse des éléments fins (50 μ à 150 μ). Pour un échantillon de faible masse ou assez grossier, un quart d'heure est largement suffisant. Si l'échantillon est volumineux et riche en éléments fins, il m'a paru bon d'aller jusqu'à 40 ou 45 minutes. Dans les cas intermédiaires, la durée normale peut être 20 à 30 minutes. Il ne m'a pas semblé, d'ailleurs, que la prolongation du tamisage eût des inconvénients graves, même avec des appareils à secousses assez brutales : le bris des grains est exception-

(1) Voir notamment, sur ces sujets, Berthois et Aubert (1949 et 1950), et L. et C. Berthois (1951).

nel, sauf cas particuliers comme celui de coquilles fragiles dans les parties grossières, ou de lamelles de mica ou de piquants d'oursins (spécialement *Echinocardium*) dans les parties fines ; aux quels cas, il faut prendre garde à limiter le tamisage au minimum.

Contrairement à beaucoup d'auteurs, je n'ai donc pas imposé, de façon plus ou moins arbitraire, une durée uniforme au tamisage. A mon sens, cette durée uniforme (à moins qu'elle soit longue) aggrave encore l'inconvénient, souligné plus haut (p. 299) des colonnes de tamis : elle soumet au même régime des sables grossiers, dont le tamisage est parfait en 5 ou 10 minutes, et des sables à maximum pondéral fin, qui passent bien plus lentement. Il est bon de laisser aux opérations quelque souplesse, et comme je devais fractionner en deux la colonne de tamis A.F.NOR. pour l'assujettir sur la machine correspondante, je n'hésitais pas à régler en 10 à 15 minutes le tamisage sur la moitié de colonne à larges mailles, quitte à mettre un temps double, triple ou même quadruple pour la moitié fine. Cette solution de compromis évoque de façon imparfaite le procédé long et pénible que je continue à considérer comme le meilleur : le secouage des tamis séparément et à la main, avec appréciation directe de la durée convenable en chaque cas particulier.

Dans les conditions de cette technique d'ensemble, les erreurs qui peuvent résulter d'un choix imparfait de la masse de l'échantillon et de la durée de tamisage ne me semblent pas dépasser celles, malheureusement inévitables, qui proviennent du décrassage irrégulier des tamis et des incertitudes sur la valeur exacte de la maille moyenne. C'est pour la même raison que, effectuant les pesées (à Paris du moins), à l'aide d'une balance Mettler, je les ai faites, en général, au demi-milligramme près, ne cherchant le dixième de milligramme que pour des portions très peu abondantes d'éléments très fins. On ne pourra d'ailleurs discuter plus complètement l'approximation des résultats qu'après avoir envisagé leur représentation graphique.

C. - Choix des représentations graphiques

La représentation graphique des résultats d'un tamisage implique toujours qu'en fonction du vide de maille moyen de chaque tamis, on porte une grandeur en relation avec la quantité de sédiment retenue par ce tamis. On a remarqué souvent qu'aucun des modes de représentation proposés n'ajoute rien aux données du tamisage, mais certains d'entre eux sont plus favorables à la mise en évidence de telle ou telle propriété, tandis que d'autres peuvent créer de véritables artefacts graphiques ou mathématiques et mener à des conclusions erronées. Il faut donc discuter les principaux d'entre eux.

Malgré son grand intérêt général, et bien qu'elle ait été adoptée comme méthode standard par des établissements de recherches géologiques appliquées, on n'insistera pas ici sur la représentation en coordonnées polaires, préconisée par A. Rivière (1937). Comme l'a fait remarquer Max Lafon (1953), très utile pour des études de géologie comportant de forts écarts granulométriques, elle manque de précision quand on doit comparer des sables assez différents, comme il

arrive souvent en écologie marine. On se bornera donc ici à l'emploi de coordonnées rectangulaires, en portant en abscisses les vides de maille moyens des tamis : aussitôt, se pose la question de l'échelle à adopter pour ces abscisses.

Ce sera une échelle logarithmique. Elle ne s'impose pas par principe, mais du premier au dernier tamis de nos séries les vides de mailles varient sensiblement dans le rapport de 100 à 1. Une échelle arithmétique rendrait les graphiques illisibles au niveau des tamis fins. Une échelle logarithmique est beaucoup plus claire ; et si l'on a pu (Krumbein, 1938) suggérer l'emploi de logarithmes de base 2 pour représenter les résultats obtenus sur tamis Tyler de raison $\sqrt{2}$, les logarithmes courants, de base 10, sont parfaitement adaptés à la série théorique A.F.NOR., de raison $\sqrt[10]{10}$. Conformément à l'usage banal, on portera donc toujours ici en abscisses les ouvertures moyennes des mailles, dans l'échelle logarithmique ordinaire de base 10, les abscisses croissant de gauche à droite. Par commodité, l'origine des axes correspondra à une ouverture de mailles de 10 μ , et le graphique s'étendra vers la droite jusqu'à 3 mm environ.

Pour les ordonnées, l'idée la plus immédiate est de porter pour chaque tamis la masse de sédiment qu'il retient, après l'avoir, bien entendu, transformé en pourcentage de la masse totale de l'échantillon. On obtient ainsi un histogramme de fréquence pondérale, qui est correct si les ouvertures de mailles sont distribuées suivant une loi régulière et qui est alors fonction de cette loi. L'histogramme est donc utilisable directement si la série des tamis est une série A.F.NOR. théorique ou toute autre série en progression géométrique. Sinon, l'espacement des tamis est désordonné et il faut, ou corriger ce type de représentation, ou en chercher un autre. Ceci est vrai pour notre série Hydrotechnica, et aussi, de façon moins impérieuse, pour les séries A.F.NOR. commerciales.

La recherche d'une autre représentation a mené à la courbe cumulative pondérale, qui est aussi anciennement utilisée que l'histogramme précédent. Ici, l'ordonnée qui correspond à un tamis représente, en pourcentage, la masse totale de sédiment qui a traversé ce tamis. Les irrégularités du graphique liées à celles de la série de tamis sont alors très atténuées, si bien que, pour des tamis assez nombreux et serrés, la courbe cumulative pondérale d'un même sédiment différerait très peu d'une série à l'autre. On peut donc, à partir d'elle, construire une courbe de fréquence pondérale plus exacte que si on la traçait à partir de l'histogramme. La courbe cumulative pondérale est d'un usage très répandu et à peu près indispensable. Elle sert couramment, ainsi que la courbe de fréquence pondérale, au calcul de divers indices et paramètres statistiques classiques. A. Rivière (1952), étudiant analytiquement ses formes typiques, a fondé sur elle sa théorie des faciès granulométriques.

Si l'on cherche d'autre part à corriger l'histogramme de fréquence pondérale brut, on peut le faire de diverses façons, en remarquant en tous cas que le pourcentage pondéral p , retenu par un tamis, dépend non seulement du vide de maille moyen d_2 de ce dernier, mais aussi du vide de maille moyen d_1 du tamis immédiatement supérieur. On peut alors, avec Rivière (1937) prendre pour ordonnée le quotient de p par

d_1 - d_2 . On peut, avec Bagnold, adopter le quotient de p par $\log d_1$ - $\log d_2$, c'est-à-dire par $\log \frac{d_1}{d_2}$, et l'on obtient alors ce que Bagnold a appelé le « diagramme différentiel ». On peut songer aussi au quotient de p par $\frac{d_1}{d_2}$, c'est-à-dire à $p \frac{d_2}{d_1}$. Sans être superposables, ces diverses corrections sont assez voisines et de même sens. Chacune a ses avantages, et il est difficile de choisir l'une d'elles pour des motifs théoriques.

La correction de Rivière peut rendre de grands services. Son emploi m'a permis, dans une note préliminaire (1956), de mettre un peu d'ordre dans les données brutes de mes tamisages de 1955. J'ai montré ainsi que dans les histogrammes de fréquence pondérale établis pour les sables intercotidaux bretons se retrouvent très souvent un à quatre maxima sur des abscisses caractéristiques : conclusion qui sera interprétée en conséquence des présentes recherches. Mais la correction de Rivière a l'inconvénient d'altérer les dimensions de la quantité portée en ordonnée : ce n'est plus une masse, ni géométriquement un volume, mais une surface, sans que l'on sache exactement quelle surface.

Le diagramme différentiel de Bagnold a l'avantage d'être conçu en fonction des abscisses logarithmiques, et de donner ainsi une signification simple à l'aire de l'histogramme corrigé, aussi bien qu'à celle de la courbe de fréquence corrigée que Bagnold en déduit directement. Il a l'avantage aussi que la courbe de fréquence corrigée peut se tirer de la courbe cumulative comme sa dérivée première. Mais il introduit dans le calcul des ordonnées logarithmiques, les logarithmes des diamètres de grains, et altère par conséquent, lui aussi, les dimensions des quantités portées en ordonnées.

Le développement de mes interprétations graphiques exigeant, on le verra, que compte soit tenu des dimensions des grandeurs considérées, j'ai préféré adopter ici la correction en $p \frac{d_2}{d_1}$, qui n'a pas certains avantages du diagramme de Bagnold, mais qui est mieux adaptée à mon but : traduire, de façon au moins approchée, les données granulométriques non en masses, mais en nombre de grains. Mais, avant d'en arriver là, il faut encore rappeler ce qu'est le « diagramme logarithmique » de Bagnold.

Cet auteur a remarqué avec raison que son « diagramme différentiel », en ordonnées arithmétiques, écrase les ordonnées de l'histogramme ou de la courbe dans les régions qui sont éloignées du maximum et ne permet pas d'analyser ces régions correspondant aux grains petits et gros. Il a donc proposé d'utiliser une échelle logarithmique pour les ordonnées aussi. Traduisant ainsi le « diagramme différentiel », il a obtenu un type de « diagramme logarithmique » dont il a montré les avantages et étudié les propriétés. De toutes les représentations graphiques examinées ici jusqu'à présent, celle-ci est la première qui soit, non pas semi-logarithmique, mais bilogarithmique. Il va sans dire que l'on peut, de la même façon, traduire en coordonnées bilogarithmiques la courbe de fréquence corrigée en $p \frac{d_2}{d_1}$. Et c'est aussi en coordonnées bilogarithmiques que nous serons amenés

à tracer la courbe granulométrique calculée en nombre de grains. Celle-ci s'obtient par les considérations suivantes (Prenant, 1958).

Soit p la masse (rapportée à 100 g. de sable sec), retenue entre deux tamis dont les mailles ont respectivement pour côté d_1 et d_2 cm. (d_1 étant $> d_2$). Chaque grain admet trois diamètres principaux rectangulaires inégaux, et le refus sur une maille est déterminé en principe par le diamètre intermédiaire, qui est donc compris entre d_1 et d_2 . A la condition indispensable que l'échelle des tamis soit assez serrée et que les grains soient assez nombreux, on peut considérer dans la masse p que les diamètres intermédiaires admettent une moyenne voisine de $\sqrt{d_1 d_2}$.

Supposons provisoirement les grains presque sphériques et de même densité σ . Le diamètre moyen des sphères à considérer sera $c\sqrt{d_1 d_2}$, c étant un coefficient de forme, tel que ces sphères aient même masse que le grain réel moyen. D'autre part, la masse de sable à considérer n'est pas p , mais la masse corrigée comme il a été dit plus haut, $p \frac{d_2}{d_1}$. Dans ces conditions, le nombre n de grains est donné par

$$n = \frac{6}{\pi} \frac{1}{c^3 \sigma} (d_1 d_2)^{-\frac{3}{2}} \times p \frac{d_2}{d_1}$$

ou

$$n = \frac{6}{\pi} \frac{1}{c^3 \sigma} d_1^{-\frac{5}{2}} d_2^{-\frac{1}{2}} \times p.$$

Dans les granulométries courantes, n peut varier de 0 à 10^8 , et il est indispensable d'utiliser des coordonnées bilogarithmiques. Dans le cas simple où l'on suppose les grains purement quartzeux ($\sigma = 2,65$) et à peu près sphériques ($c = 1$) :

$$\log n = 1,85775 - \frac{5 \log d_1 + \log d_2}{2} + \log p.$$

La somme des deux premiers termes, que nous désignerons par A , ne dépend que des tamis considérés. On peut donc la calculer une fois pour toutes pour chaque tamis à quoi l'on fait correspondre la maille d_2 , et pour l'ensemble de la série peut être dressé un tableau où chaque tamis est représenté par une valeur de A . A celle-ci, il suffit d'ajouter $\log p$ (en pourcentage) tel que le donne le tamisage, pour obtenir $\log n$. Le calcul est donc très rapide, une fois le pourcentage déterminé.

La formule se simplifie si, dans la série de tamis, les ouvertures de mailles varient en progression géométrique. Ainsi, avec une série A.F.NOR. théorique de raison 1,26 :

$$\log n = 1,60683 - 3 \log d_2 + \log p$$

Les formules données ici diffèrent quelque peu de celles qui figurent dans ma note préliminaire. C'est que dans celle-ci la correction en $p \frac{d_2}{d_1}$, indiquée dans le texte, avait été faite après coup, mais non pas incorporée au calcul. Elle l'est ici, et les formules ainsi corrigées serviront de base à tout ce qui suit.

Les données granulométriques immédiates seront donc toujours traduites graphiquement par cette méthode, qui donne en échelle logarithmique les nombres de grains calculés d'après les hypothèses précédentes.

La courbe ainsi établie sera accompagnée, en principe, de la courbe cumulative pondérale classique, qui permettra les comparaisons avec les travaux courants.

Elle pourra être accompagnée aussi, suivant les besoins, des graphiques suivants :

a) histogramme classique, de dispersion pondérale ;

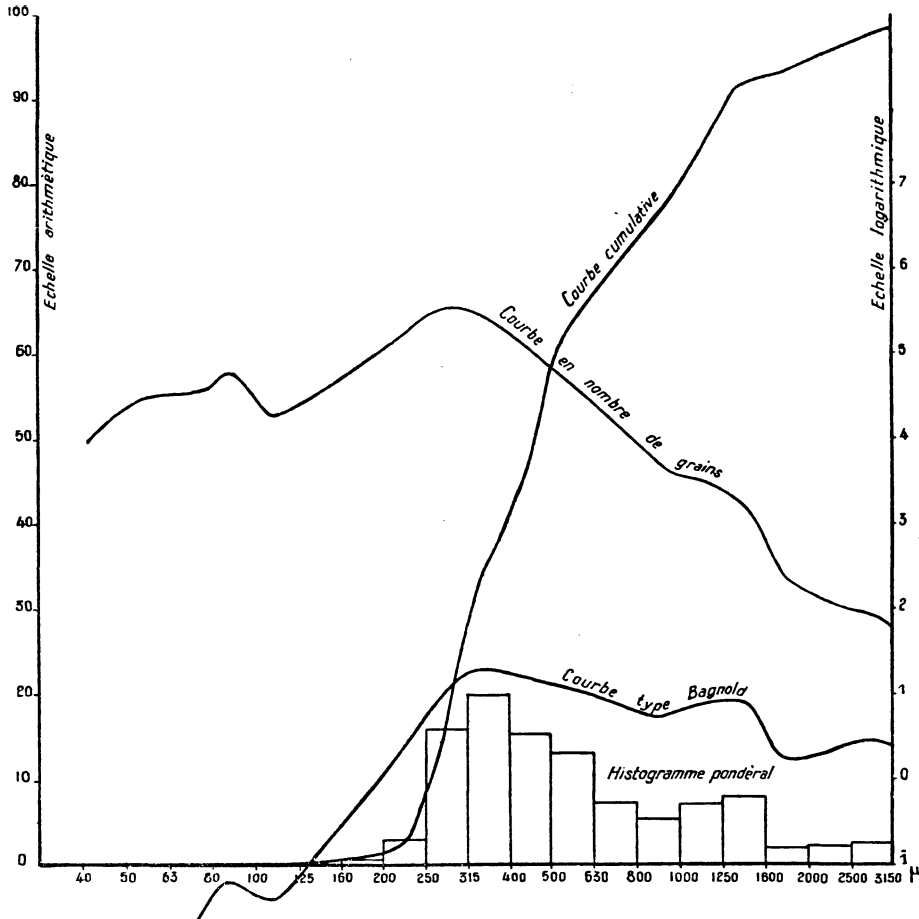
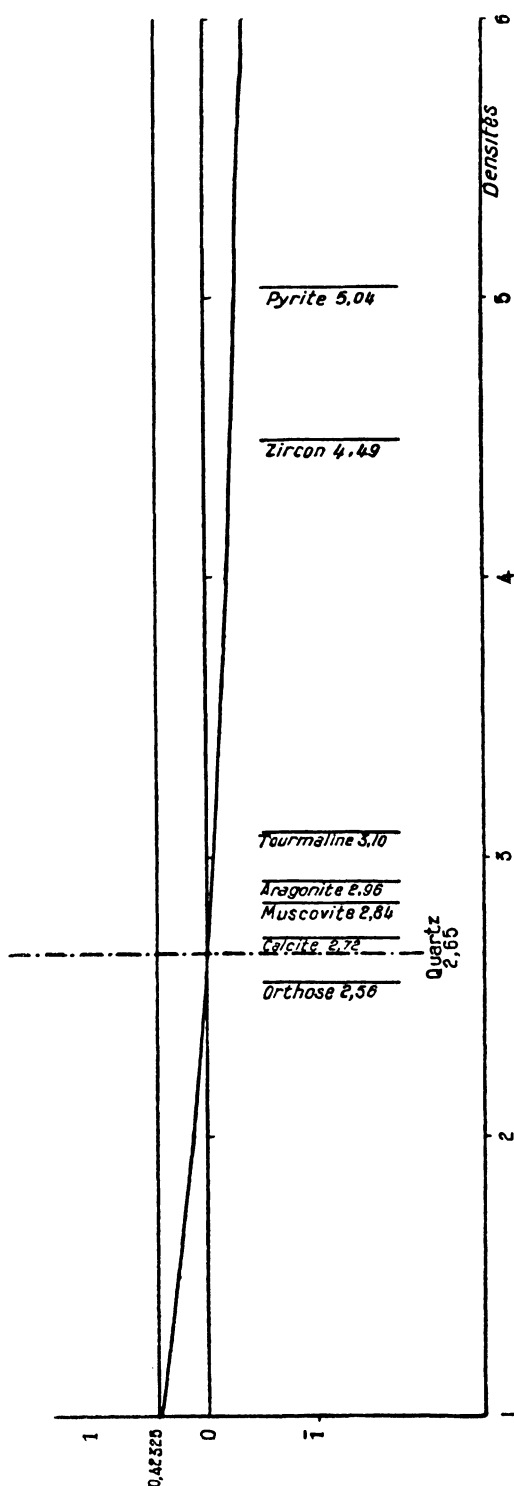


FIG. 1. — Graphiques granulométriques divers, correspondant à un même sable (banc du Loup, n° 24, près Roscoff). Ont été figurés : en ordonnées arithmétiques, l'histogramme pondéral et la courbe cumulative pondérale ; en ordonnées logarithmiques, la courbe type Bagnold (avec correction en $p \frac{d_2}{d_1}$) et la courbe bilogarithmique en nombre de grains.

b) courbe bilogarithmique de dispersion pondérale, imitée de Bagnold, mais avec la correction en $p \frac{d_2}{d_1}$, au lieu de $\frac{p}{\log d_1 - \log d_2}$. A titre d'exemple, ces quatre représentations sont données pour un même sable dans la figure 1.

Parmi les représentations graphiques retenues ici ne figure pas pour le moment celle en ordonnées de probabilité, préconisée par



Doeglas (1946) et utilisée actuellement par beaucoup de sédimentologue. Peut-être en ferons-nous usage, mais il n'a pas paru nécessaire de mettre l'accent d'emblée sur des considérations probabilistes, par rapport à la recherche d'explications causales directes.

D. - Discussion de quelques causes d'erreur

La traduction des données granulométriques brutes en nombres de grains risque évidemment d'introduire des erreurs de deux façons : d'abord parce que le calcul de ce nombre repose sur l'hypothèse assez grossière que les grains sont sphériques et ont tous la densité du quartz ; ensuite, parce que les erreurs inhérentes à toute mesure granulométrique peuvent être accrues par le calcul qui donne n et $\log n$. Il faut discuter l'importance de ces erreurs, et, dans la mesure du possible, chercher à les corriger.

1. — INFLUENCE DE LA DENSITÉ DES GRAINS

Dans notre formule générale, n est inversement proportionnel à la densité σ . Si, au lieu d'être quartzueux, les grains sup-

FIG. 2. — Graphique donnant les corrections applicables aux courbes en $\log n$, en fonction de la densité des grains, ceux-ci étant supposés tous de même densité.

Ordonnées logarithmiques. Voir le texte.

posés sphériques étaient *tous* faits d'un même minéral de densité σ' , leur nombre n' serait donc tel que

$$\log n' - \log n = \log 2,65 - \log \sigma' = 0,42325 - \log \sigma'$$

Cette expression simple est la correction de densité à faire subir à la courbe en ce cas. La figure 2 donne cette correction immédiatement et à l'échelle adoptée pour les ordonnées de nos courbes, pour toutes les valeurs de la densité comprises entre 1 et 6, c'est-à-dire débordant largement toutes celles auxquelles nous avons affaire. On peut l'utiliser d'ailleurs, non seulement pour des minéraux non quartzeux, mais aussi pour des grains poreux : par exemple, pour beaucoup de calcaires biogènes, sur lesquels on reviendra p. 310. Quant aux divers minéraux qui peuvent se trouver dans les sables, on a porté sur le graphique les densités de certains d'entre eux. On voit que pour l'orthose ($\sigma' = 2,56$), la correction serait positive, mais à peu près insensible. Pour la calcite ($\sigma' = 2,72$), elle serait négative et moindre encore. Elle serait négative encore, et à peine plus forte pour l'aragonite ($\sigma' = 2,96$) ou la muscovite ($\sigma' = 2,84$). Pour des minéraux lourds plus rares seuls, comme la tourmaline ($\sigma' = 3,10$), le zircon ($\sigma' = 4,49$), la pyrite ($\sigma' = 5,04$), la correction, négative aussi, modifierait sensiblement la courbe calculée. Les différences sont évidemment plus impressionnantes, si on les traduit en pourcentages du nombre de grains au lieu de les donner en unités logarithmiques. Mais il faut remarquer, d'abord, que ce qui nous importe est la déformation que l'erreur fait subir à la courbe bilogarithmique, et aussi que le raisonnement précédent suppose tous les grains de même nature aberrante. Or, si dans les sables marins bretons, on trouve assez souvent des teneurs de 40 à 50 pour 100 de calcite ou d'aragonite, on n'y rencontre que des proportions assez minimes de minéraux lourds. On essaiera (p. 319) de donner une idée de l'efficacité de ces faibles pourcentages. Quant au cas extrême où tous les grains seraient constitués d'un même minéral aberrant, les faits sont résumés dans le tableau suivant :

Minéral	Densité	Correction de la courbe (en unités logarithmiques)	Modification du nombre de grains (en pourcentage)
Orthose	2,56	+ 0,015	+ 3,5
Quartz	2,65	0	0
Calcite	2,72	— 0,011	— 2,5
Muscovite	2,84	— 0,030	— 6,7
Aragonite	2,96	— 0,048	— 10,5
Tourmaline	3,10	— 0,068	— 14,5
Zircon	4,49	— 0,229	— 41,0
Pyrite	5,04	— 0,279	— 47,4

Au total, les corrections de densité sont pour nous, en général, négligeables, à moins que les minéraux aberrants ne soient concentrés artificiellement sur certains tamis, du fait du tamisage lui-même, ce qui ne peut être un effet de la densité, mais d'une forme elle-même aberrante. L'expérience montre qu'il peut en être ainsi pour des pail-

lettes de micas, des spicules d'Eponges, des piquants d'Oursins, de petites coquilles, etc. Nous devons donc revenir sur l'effet de densité après avoir discuté l'effet de forme.

2. — INFLUENCE DE LA FORME DES GRAINS

La forme des grains est représentée dans nos formules par l'introduction d'un paramètre c qu'il est difficile d'interpréter de façon générale, mais à propos de quoi on peut envisager quelques cas géométriquement simples, schématisant plus ou moins directement des exemples réels.

α) Supposons que la fraction retenue sur le tamis d_2 soit faite en totalité de grains sphériques creux, dont se rapprocheraient, par exemple, des coquilles globuleuses telles que Natices, Littorines, ou certains tests de Foraminifères. Leur diamètre extérieur moyen est $\sqrt{d_1 d_2}$. Si l'on désigne par ε la fraction du diamètre qui correspond à la double épaisseur de la coque, le volume de la sphère creuse moyenne est la différence entre la sphère externe et la sphère interne, et sa masse est :

$$\frac{\pi}{6} (d_1 d_2)^{\frac{3}{2}} \left[1 - (1 - \varepsilon)^3 \right] \sigma, \text{ ou } \frac{\pi}{6} (d_1 d_2)^{\frac{3}{2}} (\varepsilon^3 - 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon) \sigma.$$

Cette masse doit être égale à celle $\frac{\pi}{6} (d_1 d_2)^{\frac{3}{2}} \sigma$ de la sphère moyenne hypothétique qui a servi de base au calcul de n . On a donc :

$$c^3 = \varepsilon^3 - 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon$$

Quand ε varie de 0 (sphère à paroi infiniment mince) à 1 (sphère pleine), c^3 croît constamment de 0 à 1. La variation est figurée par une courbe de la figure 3.

Mais les applications de ce résultat aux coquilles globuleuses ne sont pas immédiates, car leur forme est assez éloignée de la sphère ; leur orifice est ouvert, mais surtout il faut tenir compte de l'existence, à l'intérieur, de la columelle et des parois internes des spires. Pour notre correction, l'effet est une modification (presque toujours une augmentation) de la densité moyenne, qui conduit à considérer un ε' fictif, supérieur à celui de la mesure directe. On peut le déterminer, dans les cas favorables, par pesée d'un nombre connu des grains aberrants, calibrés sur un tamis. Empiriquement, on obtient aussi des résultats assez satisfaisants en doublant, pour tenir compte des structures internes, la valeur directement mesurée (voir tableau de la p. 313).

β) Supposons que la fraction retenue sur le tamis d_2 soit faite entièrement de cônes creux, évoquant des coquilles telles que Turritelles, Cérithes, Nasses, *Trochus*, etc. Soit d le diamètre de base du cône, h sa hauteur, α son angle au sommet, ε la fraction de d qui correspond à la double épaisseur de la coque ; on a :

$$h = \frac{d}{2} \cot \alpha.$$

Un calcul analogue à celui fait pour la sphère creuse donne pour la masse du cône creux :

$$\frac{\pi}{24} \cot \alpha d^3 (\varepsilon^3 - 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon) \sigma.$$

Dans l'hypothèse où le cône ne peut traverser les tamis d_1 et d_2 qu'en ayant son axe normal à eux, la moyenne des grains satisfait à la condition $d = \sqrt{d_1 d_2}$. On obtient alors la masse du cône creux

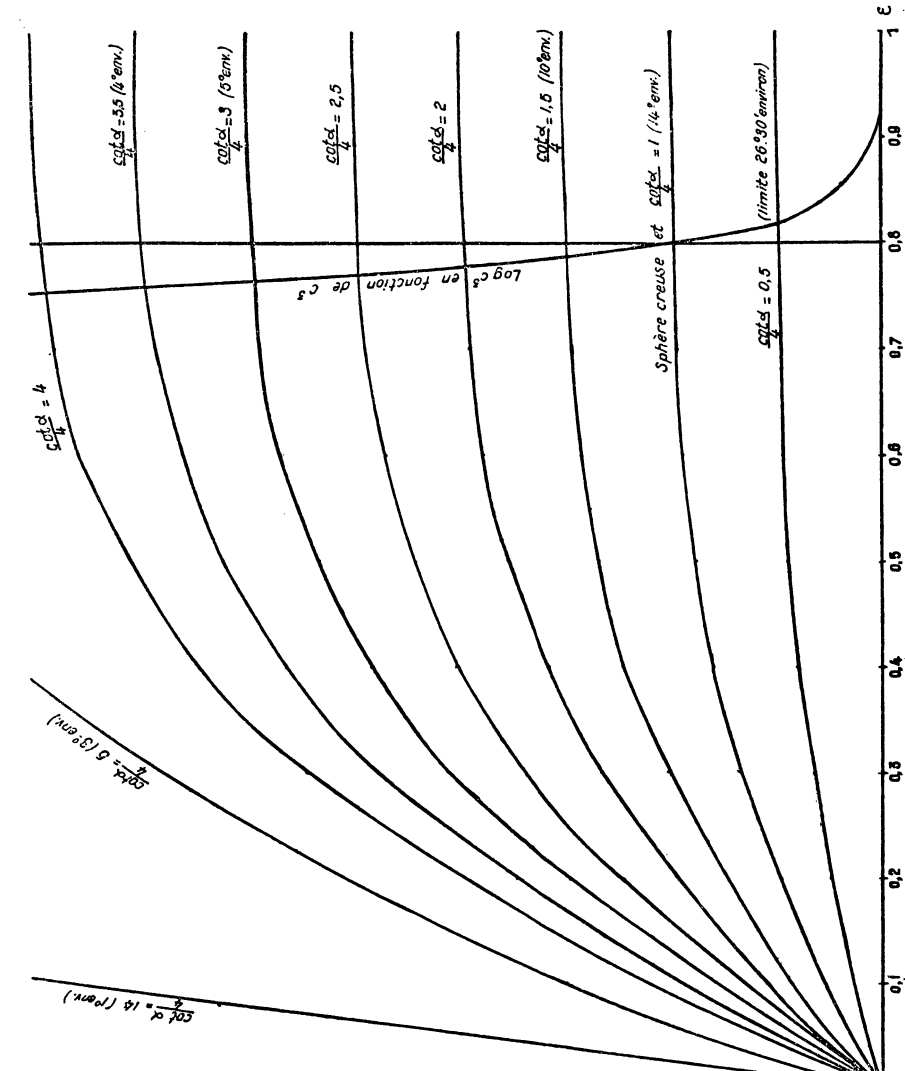


FIG. 3. — Graphique donnant les corrections applicables aux courbes en $\log n$, pour des cônes creux d'angle au sommet α variable et d'épaisseur de paroi variable. La courbe correspondant aux sphères creuses est identique à celle du cône

creux pour lequel $\frac{\cot \alpha}{4} = 1$. Voir le texte.

moyen en remplaçant d par $\sqrt{d_1 d_2}$ dans l'expression ci-dessus de la masse du cône creux. En écrivant qu'elle est égale à celle de la sphère pleine moyenne hypothétique, on a :

$$c^3 = \frac{\cot \alpha}{4} (\epsilon^3 - 3\epsilon^2 + 3\epsilon).$$

Cette expression est analogue à celle trouvée pour la sphère creuse, mais avec un paramètre $\frac{\cot \alpha}{4}$, qui ne dépend que du cône considéré, et qui est fonction décroissante de son angle au sommet. Dans la figure 3, on a représenté, pour diverses valeurs de $\frac{\cot \alpha}{4}$, les variations de c^3 en fonction de ε . Pour $\cot \alpha = 4$, la courbe est identique à celle de la sphère creuse : α est alors légèrement supérieur à 14° . Pour des angles au sommet plus petits que cette valeur critique, les courbes de variation sont situées au-dessus de celle de la sphère et, pour une même valeur de ε , c^3 est d'autant plus grand que α est plus petit. Les courbes sont au-dessous de celle de la sphère si α est plus grand que l'angle critique de 14° . Tout ceci tient évidemment à ce que pour une même base de cône, déterminée par la maille du tamis, et un même ε , le cône est d'autant plus haut et plus lourd qu'il est plus effilé.

Mais pour de grands angles au sommet, les cônes peuvent traverser les mailles sous d'autres orientations de leur axe que normal au tamis. Pour $h = d$, soit $\cot \alpha = 2$, ou α voisin de $26^\circ 30'$, le passage du tamis peut se faire, l'axe du cône étant dans le plan de la maille et perpendiculaire à son côté. On a donc là une valeur limite de α , au-delà de laquelle notre calcul ne s'applique plus, mais devrait être refait sur d'autres hypothèses. Sans reprendre toute cette discussion, nous remarquerons que le cône pourra traverser la maille, son axe orienté suivant la diagonale de celle-ci, si $\cot \alpha$ est inférieur à $\frac{4 - \sqrt{2}}{2}$, soit α légèrement inférieur à 29° . Pour des angles plus ouverts encore (cas de Patelles, par exemple), le passage reste possible à condition que d ne dépasse pas la longueur de la diagonale de la maille $\sqrt{2} d_1 d_2$, et que soit respectée la relation $h = \frac{d}{2} \cot \alpha$. Théoriquement, on peut rejoindre ainsi le cas d'une lame passant en diagonale. Pratiquement, dans les exemples extrêmes, α ne dépasse guère 70° .

Du côté des petits angles au sommet, on est limité par l'absence probable de cas réels. D'une enquête étendue, faite sur échantillons naturels et sur figures dignes de foi, il résulte que pour les coquilles de Gastéropodes α ne descend guère au-dessous de 6° soit $\cot \alpha = 9,5$ (cas de certains *Triforis* ou *Cerithiopsis*). C'est pourquoi, au-delà de $\cot \alpha = 12$ (soit α voisin de 5°), on s'est borné dans le graphique à quelques indications sommaires.

En ce qui concerne l'évaluation de ε pour une coquille donnée, il faut plus de précautions encore que dans le cas des coquilles voisines de la sphère, et cette évaluation directe risque plus encore de mener à des erreurs : car aux structures internes telles que la columelle s'ajoutent encore des portions de coquille (siphon, par exemple), parfois très importantes, situées au-delà du maître-couple d'après lequel sont mesurés d et h . Il s'impose donc, en bien des cas, de déterminer par pesée un ε' fictif, seul utilisable. Il est évident, d'ailleurs, que la présence d'épines extérieures comme celles de certains *Murex*, interdirait l'application du graphique, puisque les conditions de passage du tamis seraient foncièrement modifiées.

Voici quelques données numériques, recueillies à titre d'indication sur des espèces communes. Ces espèces, pour la plupart de grande taille, n'intéressent pas directement nos tamisages, à l'exception des *Bittium* et *Rissoa*, réellement représentés en grand nombre dans certains sables (v. p. 333). Mais nous savons que les résultats calculés sont indépendants des dimensions absolues, et ces exemples peuvent servir de repères de forme dans l'utilisation du graphique 3.

Espèces	Angle au sommet α	$\frac{\cot \alpha}{4}$	ε' par mesure directe (doublée)	c^3 déduit du graphique	c'^3 par pesée (voir p. 318)
I					
<i>Turritella communis</i>	7 à 10°	1,5 à 2,0	0,15 à 0,25	0,7 à 1,10	0,7 à 1,27 (moy. 0,91)
<i>Bittium reticulatum</i> . . .	10 à 15°	0,9 à 1,5	0,2 à 0,3	0,5 à 0,9	0,6 à 1,1 (moy. 0,90)
II					
<i>Nassa reticulata</i> .	17 à 26°	0,5 à 0,8	0,2 à 0,3	0,3 à 0,7	0,33 à 0,8 (moy. 0,53)
<i>Rissoa sp.</i>	19 à 21°	0,58 à 0,71	»	»	0,3
<i>Buccinum undatum</i>	20 à 26°	0,5 à 0,7	0,05 à 0,2	0,15 à 0,4	0,2 à 0,4 (moy. 0,27)
<i>Ocenebra erinacea</i>	20 à 26°	0,5 à 0,8	0,1 à 0,3	0,2 à 0,5	0,27 à 0,6 (moy. 0,5)
<i>Nucella lapillus</i> .	24 à 35°	0,35 à 0,55	0,15 à 0,35	0,15 à 0,55	0,40 à 0,80 (moy. 0,63)
III					
<i>Littorina littorea</i>	29 à 33°	0,4 à 0,45	0,15 à 0,25	le paramètre c^3 n'ayant pas de signification ici, n'a pas été évalué.	
<i>Trochocochlea crassa</i>	30 à 35°	0,3 à 0,42	0,15 à 0,25		
<i>Ziziphinus conuloïdes</i>	33 à 40°	0,3 à 0,38	0,15 à 0,18		
<i>Gibbula maga</i> . .	35 à 45°	0,25 à 0,35	0,13 à 0,25		
<i>Trochus cinerarius</i>	40 à 45°	0,25 à 0,3	0,12 à 0,25		
<i>Trochus umbilicalis</i> . . .	40 à 46°	0,24 à 0,3	0,15 à 0,25		
<i>Patella vulgata</i> . .	43 à 70°	0,09 à 0,27	0,05 à 0,1 (non doublé)		

Dans ce tableau, les coquilles se répartissent en trois groupes. Le dernier (III) comprend celles qui passent le tamis en positions diverses et que leur angle α place au-delà de la limite d'application du graphique. Le premier (I) comprend les coquilles à angle très aigu, dont les courbes représentatives se placent dans le graphique au-dessus de celles des sphères creuses ; ce sont les seules qui, en fait,

aient pour c^3 une valeur voisine de 1, et pouvant en certains cas dépasser 1. Les autres coquilles (groupe II) ont un paramètre c^3 nettement inférieur à 1 et assez variable suivant les espèces et les individus. La concordance entre les deux procédés de détermination de c^3 n'est pas mauvaise en général, sauf pour *Nucella lapillus* qui est sur les limites d'application du graphique et dont beaucoup de coquilles doivent passer le tamis en des positions indifférentes. Au cas donc, où les coquilles d'un certain type formeraient une large part d'une fraction de tamisage, on déterminera comme suit l'ordre de grandeur de la correction à apporter à la courbe. On mesure l'angle au sommet α , en entendant par là celui du cône qui a pour base le maître-couple de la coquille au cours de son passage. La valeur de $\frac{\cot \alpha}{4}$ donne la courbe à utiliser, qu'on trace au besoin par interpolation dans le réseau de courbes établi. On détermine directement ε par mesure de d et de l'épaisseur de la coquille ; et pour tenir compte des structures coquillières aberrantes par rapport au cône théorique on le multiplie par un coefficient que nous avons pris ici égal à 2. Sur la courbe correspondant à l'angle α , le point d'abscisse égale à cette épaisseur relative fictive ε' a pour ordonnée la valeur de c^3 cherchée. Le report de cette valeur sur la courbe (figurée à droite du graphique) des variations de $\log c^3$ en fonction de c^3 donnera immédiatement la correction à l'échelle même où elle doit intervenir. Ceci, bien entendu, à condition que *tous* les grains soient de même type aberrant (1).

Il ressort du diagramme que, pour les sphères creuses et pour les coquilles coniques dont l'angle au sommet est supérieur à 14° , $\log c^3$ est négatif (donc la correction à la courbe est positive) quelle que soit l'épaisseur de la coquille. Ceci est vrai, en tous cas, jusqu'à la limite angulaire de $26^\circ 30'$, qui, rappelons-le, correspond sensiblement à la forme de certaines Nasses et Pourpres ou certains Buccins. Pour les coquilles coniques dont l'angle au sommet est inférieur à 14° , $\log c^3$ est négatif aussi pour les valeurs faibles de ε' , mais positif pour les valeurs plus élevées, et à chaque angle α correspond une valeur critique de ε' pour laquelle la correction change de signe. Vers la limite des petits angles α , voisine de 5° , cette valeur critique est à peu près 0,13 ; elle augmente avec l'angle α et atteint, par exemple, 0,3 pour des angles au sommet de 10° . Or les angles compris entre 10° et 15° sont ceux des petites coquilles très coniques du type *Cerithium* ou *Bittium* qui forment parfois (voir un exemple, p. 333) dans les sables des accumulations à peu près monotypiques et sont donc à prendre en considération particulière.

β) Supposons que la fraction retenue sur le tamis d_2 soit faite entièrement de lames rectangulaires, à trois dimensions inégales

(1) On peut s'étonner de la facilité avec laquelle il est proposé de multiplier ε (mesuré) par un coefficient assez arbitraire pour obtenir ε' que l'on utilise ; mais c'est que l'ordre de grandeur de c^3 dépend bien plus de la courbe considérée, donc de α , que de la valeur prise pour ε : nouvelle confirmation du fait que la forme importe bien plus que la densité. Si ce coefficient a été pris ici égal à 2 (sauf pour *Patella*), c'est que cette valeur s'accorde assez bien avec les résultats de la détermination de c^3 par pesée (p. 318). Si, d'autre part, le réseau de courbes établi sur les hypothèses géométriques de sphères et de cônes semblait insuffisant dans certains cas, on pourrait le compléter d'après d'autres hypothèses (ellipsoïdes, par exemple, dans le cas de coquilles du type *Cypraea*, etc.).

$h > l > e$. Ceci évoque de plus ou moins près le cas fréquent de lamelles de micas ou de schistes, d'éclats de coquilles de Lamellibranches, de plaques d'Oursins, ou même de coquilles de Lamellibranches très peu bombées. Ces lames théoriques sont des prismes à base rectangle de côtés l et e . La hauteur h est supposée n'avoir permis le passage du tamis d_1 que sous une orientation normale à ce tamis, le passage ayant d'ailleurs pu se faire en diagonale de la maille. On tire de là la condition :

$$h + e > d_1 \sqrt{2}$$

Dans cette orientation, les lames sont retenues par le tamis d_2 . On a donc, en moyenne :

$$e + l = \sqrt{2 d_1 d_2}$$

Exprimant que la masse de la lame, $el\sigma$, est égale à celle de notre sphère pleine théorique moyenne, on a :

$$el = \frac{\pi}{6} c^3 \frac{(d_1 d_2)^{\frac{3}{2}}}{h}$$

e et l sont donc les racines de l'équation du second degré :

$$6 h x^2 - 6 h \sqrt{2 d_1 d_2} x + \pi c^3 (d_1 d_2)^{\frac{3}{2}} = 0.$$

Ces racines étant réelles dans le problème posé, la condition imposée au discriminant donne :

$$c^3 \leq \frac{3 h}{\pi \sqrt{d_1 d_2}}.$$

Le cas du discriminant nul correspond au cas limite où $e = l = \frac{\sqrt{2 d_1 d_2}}{2}$, c'est-à-dire à un prisme à base carrée qui passe librement dans la maille d_2 , en d'autres positions que la diagonale, pour toutes les valeurs de $\frac{d_1}{d_2}$ représentées dans nos séries de tamis. Dans les autres cas, posons $l = me$; m est le coefficient d'aplatissement de la lame, et l'on a :

$$e = \frac{\sqrt{2 d_1 d_2}}{1 + m}$$

$$\text{et} \quad me^3 = \frac{\pi}{6} c^3 \frac{(d_1 d_2)^{\frac{3}{2}}}{h}.$$

$$\text{On tire de là :} \quad c^3 = \frac{12 m}{\pi (1 + m)^2} \cdot \frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}}$$

c^3 est proportionnel à $\frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}}$, le coefficient de proportionnalité étant une fonction de m décroissante pour toutes les valeurs de m acceptables, c'est-à-dire supérieures à 1. Les droites correspondantes ont été tracées dans la figure 4 pour quelques valeurs de m . On a porté en abscisses $\frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}}$, en graduant l'échelle en π . L'usage de ce graphique est analogue à celui relatif aux cônes et sphères creux : détermination de c^3 , pour un m donné, en fonction de l'allongement $\frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}}$; et détermination de $\log c^3$ en fonction de c^3 , à l'aide de la courbe tracée à droite.

Il y a des limites à l'emploi de ce réseau de droites. Pour $m < 1 + \sqrt{2}$, tout d'abord, des considérations géométriques simples montrent que la baguette peut traverser la maille autrement qu'en diagonale, et nos calculs ne jouent plus. La baguette de plus large

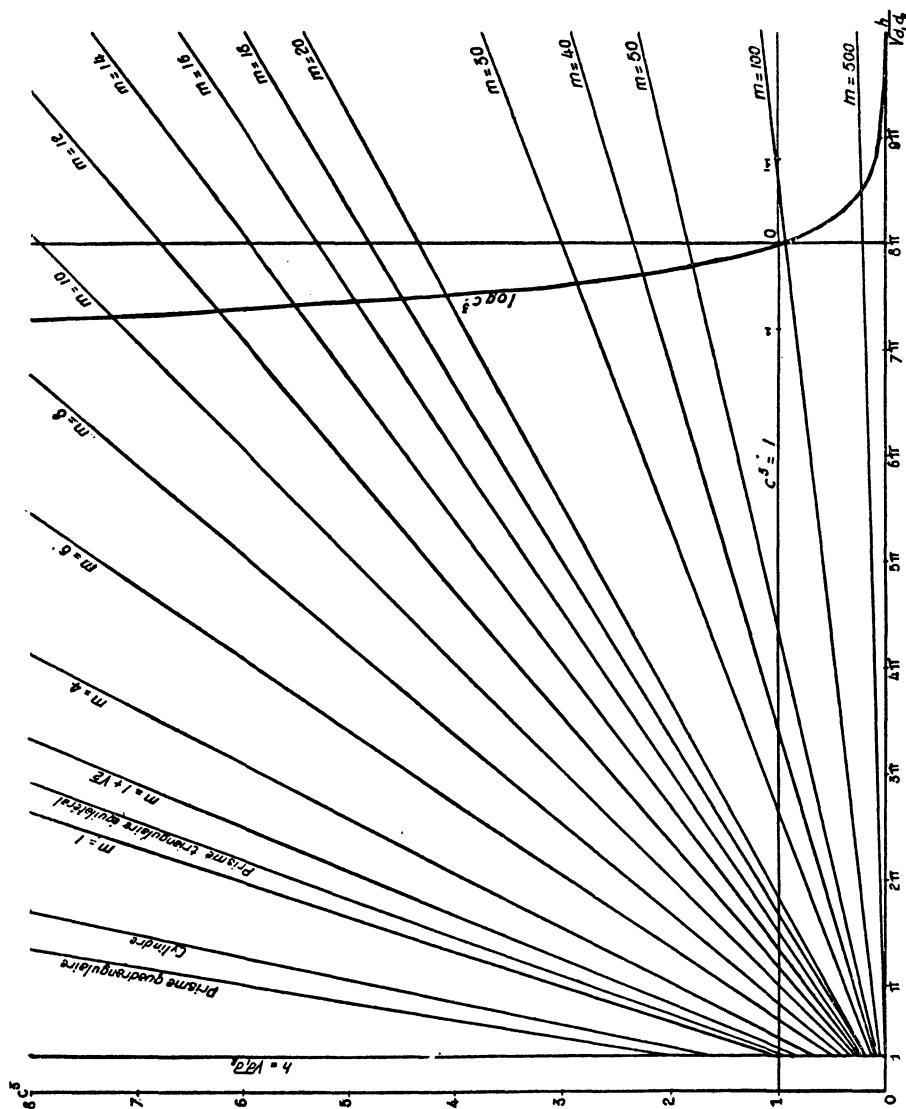


FIG. 4. — Graphique donnant les corrections applicables aux courbes en $\log n$, pour des prismes et cylindres et pour des lames allongées, d'aplatissement m variable. Voir le texte.

section possible est évidemment le prisme à base carrée de côté $\sqrt{d_1 d_2}$. En égalant son volume à celui de notre sphère pleine moyenne théorique, suivant la méthode employée précédemment, on obtient pour lui une droite figurative qui a été portée dans le graphique et le limite à gauche. Entre cette droite et la droite $m = 1 + \sqrt{2}$ se pla-

ceraient celles qui correspondent à toute la diversité des prismes possibles. Il m'a semblé utile de calculer et de figurer celles relatives au cylindre (cas de piquants d'Oursins, de spicules d'Eponges, d'articles de *Cellaria*, etc.) et au prisme triangulaire équilatéral (approximativement cristaux de tourmaline). C'est dans cette même zone que se fait facilement le raccord avec le cas des cônes à angle au sommet très faibles.

D'autre part, pour l'abscisse $\frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}} = 1$ on a affaire à des grains qui passent le tamis d_2 en n'importe quelle orientation et qui n'appartiennent pas à sa charge normale. Il faut donc supprimer toute la partie du graphique comprise entre 0 et 1. Cela signifie que, pour les baguettes cylindriques prismatiques à base carrée et prismatique triangulaire considérées à l'alinéa précédent, c^3 est toujours >1 , et qu'il en est de même pour tous les cas dont la droite figurative aurait une pente plus forte que celle passant par le point de coordonnées 1 et 1 (soit $m = 2,2$ environ). 2,2 étant plus petit que $1 + \sqrt{2}$, toutes les lames qui sont contraintes de passer en diagonale peuvent théoriquement correspondre, suivant leur longueur, à un c^3 plus grand ou plus petit que 1, c'est-à-dire à une correction dans l'un ou l'autre sens. La longueur critique à cet égard est d'autant plus grande que la lame est plus mince, ce qu'on pouvait prévoir qualitativement.

Dans la pratique, h et m sont limités tous deux par le bris des lames (et, pour h , des baguettes) dans les conditions naturelles. Aussi, n'aura-t-on à utiliser le graphique que dans les régions relativement proches de l'origine des axes. Une lame de $m = 50$ atteindra sans doute bien rarement la longueur de 14 ouvertures de maille environ qui lui donnerait un c^3 supérieur à 1, tandis qu'il suffira au cylindre d'avoir une longueur de 5 ouvertures de maille pour arriver à un c^3 égal à 8. C'est pourquoi, dans le graphique ici publié, on n'a pu adopter la même échelle d'ordonnées que dans le graphique des cônes, ce qui aurait pourtant facilité les comparaisons. Si l'on est amené, dans des cas particuliers, à faire des mesures sur les dimensions des lames et des baguettes, il ne faudra pas oublier le bris supplémentaire dû au tamisage (voir p. 299). Il sera bon d'en apprécier l'importance par comparaison avec une fraction du même sable non tamisé.

Pour fournir une idée approximative de résultats concrets, on peut donner ci-après les résultats moyens concernant quelques valves de Lamellibranches assez plates et allongées pour être grossièrement assimilables aux lames rectangulaires précédentes. L'épaisseur a été

Espèces	Coefficient d'aplatissement m	Largeur l en mm.	Longueur h en mm.	$\frac{h\sqrt{2}}{l} = \frac{h}{\sqrt{d_1 d_2}}$	c^3 déduit du graphique
<i>Ensis ensis</i>	22	14,5	110	10,7	1,70 env.
<i>Solen siliqua</i>	33	16,6	104	8,8	1,10 env.
<i>Pholas dactylus</i> . .	30	16,5	59	5,2	0,65 env.
<i>Lutraria elliptica</i>	44,7	31,0	70	3,2	0,33 env.
<i>Donax vittatus</i> ..	12 à 24 (moy. 14,6)	14 à 22	23 à 36	2,26 à 2,64 (moy. 2,42)	0,65 env.

mesurée vers le milieu de la valve. Bien entendu, ici encore, on doit se rappeler que les résultats ne dépendent que de la forme, et non pas des dimensions absolues.

Mises à part, donc, des coquilles très allongées, comme celles des Solens, dont le c^3 dépasse 1, les autres ont un c^3 nettement plus petit que 1, donnant lieu à une correction positive de 0,65 au maximum, si tous les grains étaient faits de telles coquilles. Ces exemples donnent une image de ce qui peut se passer pour des lamelles bien plus petites, comme des lamelles de mica.

3. — CONCLUSIONS SUR L'INFLUENCE DOUBLE DE FORME ET DE DENSITÉ DES GRAINS

Il résulte de ce qui précède que la correction de densité est toujours assez faible, et le plus souvent négligeable. La correction de forme, au contraire, peut être plus importante, surtout si l'on a affaire à des baguettes assez longues ($c^3 > 1$; correction négative), ou au contraire à des lamelles courtes et à des coquilles à angle très ouvert ($c^3 < 1$; correction positive). On retrouve et précise ici un fait connu et classique dans un problème nettement différent (bien qu'apparenté à certains égards), celui de la sédimentation : la densité importe moins que la forme, et celle-ci moins que la grosseur des grains.

Les corrections de forme et de densité sont d'ailleurs liées. Les coquilles de Gastéropodes sont généralement faites d'aragonite, plus rarement de calcite, et la correction négative de densité correspondante doit s'ajouter algébriquement à la correction positive ou négative de forme. Les cristaux de tourmaline, les piquants d'Oursins, donneront lieu à une double correction négative, de forme et de densité. Pour des lamelles de micas, la correction de forme sera généralement positive, mais il s'en retranchera, en valeur absolue, la correction de densité. Cette dernière étant une constante dans chaque cas particulier, il est toujours facile de déduire la courbe de correction graphique globale de celle qui donne $\log c^3$ en fonction de c^3 .

En certains cas, même, on peut être conduit à lier les deux corrections dès le début du calcul. On a vu plus haut les difficultés de la détermination directe de ϵ pour les coquilles de Gastéropodes, et indiqué qu'il était possible de procéder par pesée (coquille par coquille en certains cas, ou pour un certain nombre de coquilles calibrées au tamisage). Si M est la masse ainsi déterminée pour une coquille, et si on l'identifie à celle du cône d'angle α , de diamètre d , de densité σ' et d'épaisseur relative corrigée ϵ' , on tire :

$$c'^3 = \frac{\cot \alpha}{4} (\epsilon'^3 - 3 \epsilon'^2 + 3 \epsilon') = \frac{6 M}{\pi \sigma' d^3}.$$

Les coquilles de Gastéropodes étant généralement faites d'aragonite, on peut prendre $\sigma' = 2,96$, on a :

$$c'^3 = \frac{3 M}{4,65 d^3}.$$

C'est ainsi, par mesure de M et de d , qu'ont été calculés les c'^3 de la dernière colonne du tableau, p. 313, et l'on voit qu'ils sont en assez bonne concordance avec les c^3 obtenus par la voie du graphique, à condition de doubler arbitrairement la valeur de l'épaisseur rela-

tive ε directement mesurée, pour tenir compte des structures coquillières en excès par rapport au cône théorique.

Mais, dans ce qui précède, on a supposé que *tous les grains* composant la charge du tamis présentaient les mêmes aberrations par rapport à la sphère pleine moyenne. Le cas est exceptionnel. Il faut donc envisager celui où les grains aberrants d'un même type ne forment qu'une fraction de cette charge.

Soient n_1 le nombre de grains normaux (quartzeux et à peu près sphériques) et n_2 le nombre de grains aberrants (c^3 différent de 1 et σ' différent de 2,65), contenus dans p grammes de sédiment. Soit n' la somme de n_1 et n_2 . Soient p_1 et p_2 les masses de ces deux sortes de grains, dont la somme est p . Pour simplifier, désignons par k , dans notre formule générale, l'expression $\frac{\sigma'}{\pi} d_1^{-\frac{\pi}{2}} d_2^{-\frac{1}{2}}$. On a :

$$n_1 = k p_1 \qquad n_2 = k p_2 \frac{2,65}{c^3 \sigma'}$$

$$n' = k \left(p_1 + \frac{2,65}{c^3 \sigma'} p_2 \right)$$

$$n = k (p_1 + p_2).$$

$$\text{D'où :} \quad \frac{n'}{n} = \frac{c^3 \sigma' + 2,65 \frac{p_2}{p_1}}{c^3 \sigma' \left(\frac{p_2}{p_1} + 1 \right)}$$

La correction à faire subir à la courbe est donc :

$$\log n' - \log n = \log \left(c^3 \sigma' + 2,65 \frac{p_2}{p_1} \right) - \log c^3 \sigma' - \log \left(\frac{p_2}{p_1} + 1 \right)$$

σ' est connu. c^3 peut être déterminé approximativement grâce aux graphiques précédents. $\frac{p_2}{p_1}$, qui est le rapport de la masse des grains aberrants à celle des grains normaux, serait difficile à obtenir par pesée, mais on peut compter à la loupe, sur une prise d'essai, les grains des deux catégories, et multiplier ces nombres par les densités correspondantes, σ' et 2,65. La correction est donc facile à calculer. On va le faire sur deux exemples.

Soit une fraction de tamisage qui contienne des baguettes de tourmaline (prismes presque triangulaires équilatéraux de densité 3,10) et que leur c^3 soit 8 (ce qui représente, d'après le graphique, la longueur déjà considérable de huit fois la largeur de maille). Supposons que ces baguettes forment un dixième de la masse des grains de quartz restants (soit environ 8 pour 100 du nombre de ces grains, ou 7,5 pour 100 du nombre total des grains), ce qui est une proportion rarement atteinte, même sur des côtes granulitiques. On arrive à une correction $\log n' - \log n = -0,027$, qui est à peine sensible.

Soit une fraction de tamisage contenant 50 % de calcaire (ce qui n'est pas rare sur bien des plages bretonnes), que nous supposons constitué ici de lamelles de calcite (éclats de coquilles d'huîtres) ayant en moyenne $m = 10$, $h = 6 \sqrt{d_1 d_2}$. Le graphique donne $c^3 = 2 \cdot \frac{p_2}{p_1}$ est égal à 1. La correction calculée est $-0,127$. Si les mêmes lamelles n'avaient pour longueur que le double de la largeur de maille, on

trouverait pour la correction + 0,061. Dans les deux cas, les corrections sont de sens contraire, et notables, mais insuffisantes pour altérer la forme générale des courbes, dans la plupart des cas.

Bien qu'elle n'ait utilisé qu'une géométrie très élémentaire, la discussion qui précède a pu sembler longue. Elle était nécessaire pour préciser la valeur des hypothèses, schématiques et aventurées en apparence, sur lesquelles repose le calcul du nombre de grains. Or, il résulte de là :

1° que le tracé de la courbe numérique bilogarithmique, n'est pas modifié de façon sensible tant que les grains non sphériques et non quartzeux ne sont pas à la fois très aberrants par leur densité ou leur forme, et abondants dans le sédiment considéré ou concentrés dans certaines fractions de tamisage ;

2° que dans la plupart des cas, ces grains peuvent donc être négligés, et la courbe tenue pour valable telle qu'elle est ;

3° que si des corrections paraissent nécessaires en certains cas, on peut les faire facilement, d'après les barèmes établis ci-dessus, grâce à quelques données connues ou faciles à mesurer : rapport numérique des grains aberrants aux grains normaux ; densité des grains aberrants ; allongement des baguettes ; allongement et aplatissement des lamelles ; angle au sommet des coquilles coniques ; épaisseur relative des parois, rapportée aux dimensions de la coquille (ou masse du grain) pour les coquilles d'aspect plus ou moins conique ou sphérique ;

4° que l'effet de forme et l'effet de densité, qui s'ajoutent algébriquement, s'opposent donc dans nombre de cas ; et qu'il peut y avoir, dans la fraction de tamisage considérée, des grains aberrants de plusieurs sortes dont les influences peuvent se contrarier.

Ainsi s'explique le succès, en apparence surprenant, des vérifications directes par comptage des nombres de grains. Malgré son caractère fastidieux, nous avons pratiqué ce comptage pour contrôler dix courbes, choisies très diverses. Pour les portions assez grossières, jusque vers 600 μ de diamètre, le comptage intégral n'offre pas de difficultés. Au-delà, il devient nécessaire d'opérer sur une petite fraction pesée de 5.000 à 10.000 grains environ, de compter les grains un à un sous la loupe binoculaire en les étalant sur une surface quadrillée appropriée et les y déplaçant au besoin avec un poil isolé de pinceau, puis de calculer par proportion le nombre de grains pour toute la fraction de tamisage considérée (1). Dans les dix cas, la superposition de la courbe ainsi établie et de la courbe calculée a été parfaite pour toutes les abscisses moyennes, de 125 à 500 μ : les écarts des ordonnées n'ont excédé en aucun cas 0,1. La concordance est moins bonne dans les portions grossières, où les grains sont en nombre trop faible, et de plus très hétérogènes : l'allure de la courbe est généralement conservée, mais avec d'assez gros écarts. Dans les parties très fines, d'autre part, la concordance reste bonne jusque vers un diamètre de 100 μ . On trouve au-delà des écarts importants, qui

(1) L'ingénieux appareil décrit par Lucas et Rosfelder (1957), pour compter les grains de divers calibres, ne répond aux besoins du présent problème ni par le nombre de grains étudiables ni par les diamètres accessibles ; mais il rendrait sans doute de grands services pour déterminer rapidement les grandeurs appelées m et h , dans le cas des lamelles, étudié plus haut.

n'ont rien d'étonnant étant données les difficultés pratiques du comptage, et le coefficient très important par quoi est souvent multipliée l'erreur commise. Ils ont pourtant cette particularité de comporter constamment un excès du nombre compté sur le nombre calculé : ce caractère systématique de l'erreur ne peut qu'être noté sans explication.

4. — LIMITES DE L'ERREUR INTRODUITE PAR LE CALCUL

Dans la valeur calculée de $\log n$ interviennent trois grandeurs dont la mesure comporte des erreurs : p , d_1 , et d_2 .

L'erreur sur p est exactement celle dont doit tenir compte toute représentation granulométrique. Si l'échantillon a été prélevé et traité avec soin (voir p. 298), l'erreur résulte du tamisage et de la pesée. Cette dernière ne comporte qu'une erreur négligeable pour les fractions de tamisage importantes ; mais l'erreur peut devenir sensible pour les charges de tamis très faibles : 10 pour 100 environ si la charge est de l'ordre du milligramme, ce qui arrive pour des portions très fines. L'erreur due au tamisage lui-même a été discutée p. 00 et suivantes : on a vu qu'elle résulte de diverses causes, dont les plus difficiles à réduire complètement sont le décrassage incomplet des tamis et l'évaluation inexacte de la maille. Il est très malaisé aussi d'évaluer l'importance de ces causes ; mais des auteurs très expérimentés estiment que l'erreur globale sur p peut atteindre 20 pour 100 pour certaines fractions (particulièrement faibles) du tamisage.

A cette erreur, notre calcul ajoute l'erreur relative sur $d_1^{-\frac{3}{2}}$, $d_2^{-\frac{1}{2}}$ c'est-à-dire trois fois l'erreur relative commise sur la largeur de maille, dont on peut admettre, d'après ce qui précède, qu'elle est environ le tiers de l'erreur relative sur p . Le calcul aboutit donc à doubler cette dernière, et l'erreur relative sur n a pour limite environ 40 pour 100, ce qui donne pour $\log n$, de ce fait, une erreur possible de 0,17, très supérieure à la plupart de celles auxquelles peuvent donner lieu la densité ou la forme des grains. Encore ces dernières peuvent-elles être en grande partie corrigées, comme nous l'avons vu, tandis que seules des améliorations techniques dans la construction et l'emploi des tamis pourraient réduire les erreurs provenant du calcul de n .

L'erreur possible de 0,17 sur $\log n$ est très sensible, mais non pas décourageante. Elle a été évaluée, en effet, surtout par rapport aux très faibles charges de tamis, et tout ce qui suit mettra en évidence, entre les résultats, une très bonne concordance, portant à croire que cette limite d'erreur a été largement comptée et ne se trouve, en fait, atteinte que très rarement. On le verra par une série d'exemples, dans ce mémoire et dans les suivants.

III. - APPLICATION A TROIS ANSES DE LA BAIE DE QUIBERON

Les trois anses en question sont celles de Kernarvest, de Tréhennarvour et de Kerlut, qui se succèdent d'ouest en est dans le fond de la baie de Quiberon, entre le débouché de la rivière de Crach et celui du Morbihan. Elles ont été décrites brièvement au point de

vue bionomique (celle de Tréhennarvour plus particulièrement) dans mon étude sur la baie de Quiberon (1932), et les sables que nous allons envisager ont été recueillis à cette époque, puis conservés après une première étude granulométrique. Repris récemment pour tamisage sur série A.F.NOR. et interprétation suivant les techniques ci-dessus décrites, ils ont montré, dans la représentation en nombre de grains, des caractères si spéciaux et si schématiques qu'ils méritent d'être pris comme premier exemple.

1. - Description générale

Les sables de Kernarvest, dont les représentations granulométriques sont réunies dans la figure 5, ont été prélevés en cinq points

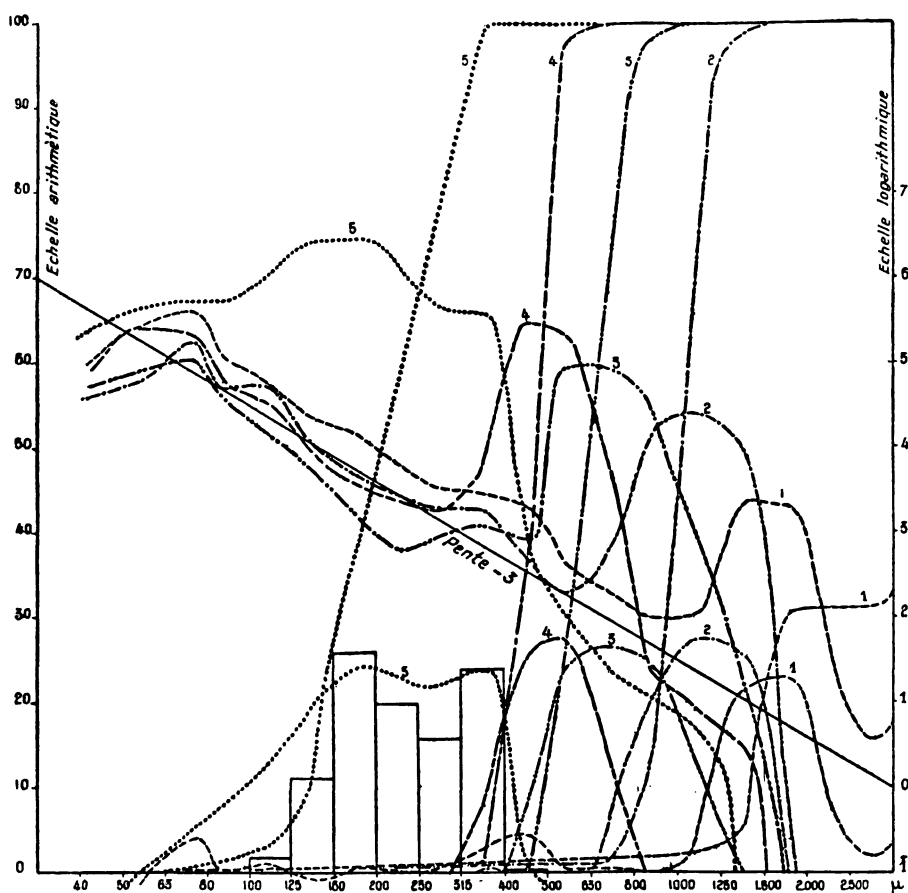


FIG. 5. — Graphiques granulométriques correspondant à cinq sables de l'anse de Kernarvest. Pour chaque sable, ont été figurées la courbe cumulative pondérale, la courbe bilogarithmique type Bagnold et la courbe bilogarithmique en nombre de grains. Pour la netteté de la figure, on n'a représenté que l'histogramme du sable n° 5.

d'une même ligne de plus grande pente. Ils ont reçu des numéros croissant du plus haut niveau vers le plus bas et, dans le même

ordre, sont de plus en plus fins. Cela s'exprime, dans le graphique, par le fait que les médianes et les portions ascendantes des courbes cumulatives sont situées, dans le même sens, de plus en plus à gauche. Il en est de même des maxima pour les courbes bilogarithmiques type Bagnold et pour les courbes bilogarithmiques en nombre de grains. Quant à l'histogramme de dispersion, il n'a été figuré que pour le sable 5, à titre d'exemple. Il est évident qu'en abscisses les points d'inflexion des courbes cumulatives coïncident avec les maxima de l'his-

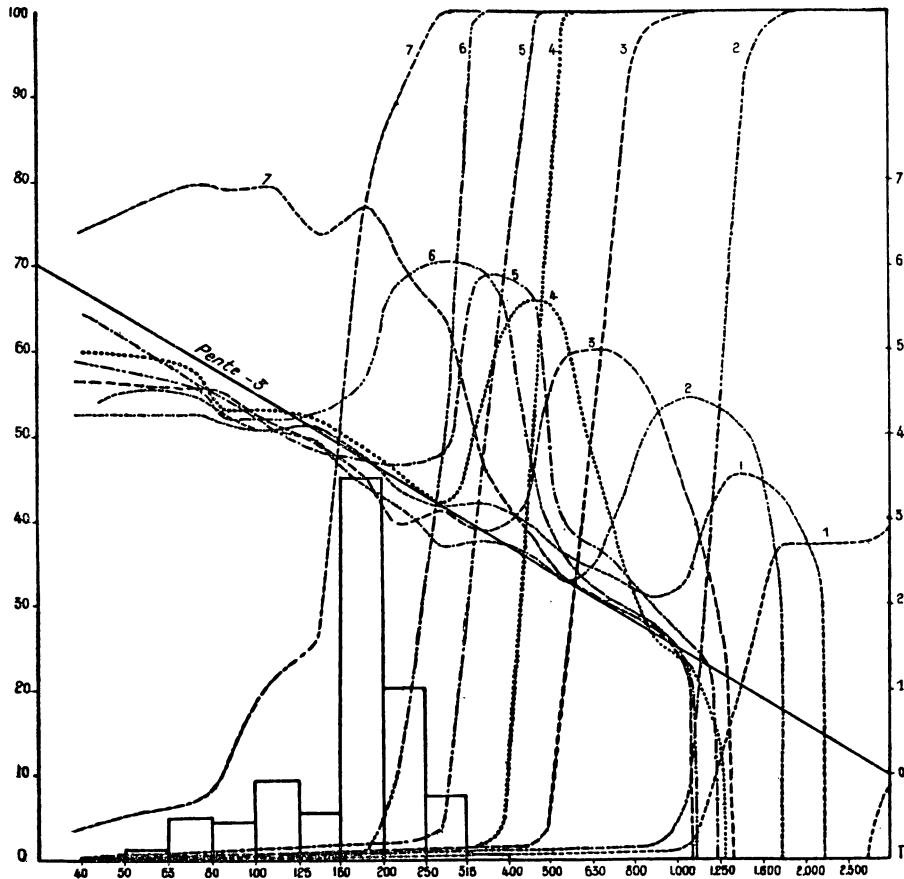


FIG. 6. — Graphiques granulométriques correspondant à sept sables de l'anse de Kerlut. Pour chaque sable, ont été figurées la courbe cumulative pondérale et la courbe bilogarithmique en nombre de grains. Pour la netteté de la figure, on n'a représenté aucune des courbes bilogarithmiques type Bagnold, et on n'a tracé qu'un histogramme (sable 7).

togramme et des courbes de Bagnold et concordent à peu près avec les maxima des courbes en nombre de grains, ces derniers pouvant être légèrement décalés vers la gauche.

Chacune de ces dernières courbes, suivie de droite à gauche, débute par un maximum très abrupt. Après quoi (du moins pour les n° 1 à 4), elles passent tout aussi brusquement par un minimum et se remettent ensuite à s'élever du côté des éléments fins. L'abscisse du

maximum varie d'un sable à l'autre, dans le même sens que la médiane et à peu près parallèlement à elle. Mais le rapprochement des cinq courbes met en évidence d'autres faits : les portions des courbes 1 à 4, situées à gauche du minimum, ont, avec quelques irrégularités, des pentes générales voisines les unes des autres ; et d'autre part, les maxima (tout au moins 2 à 5) s'alignent presque exactement sur une droite où l'on retrouve à peu près la même pente.

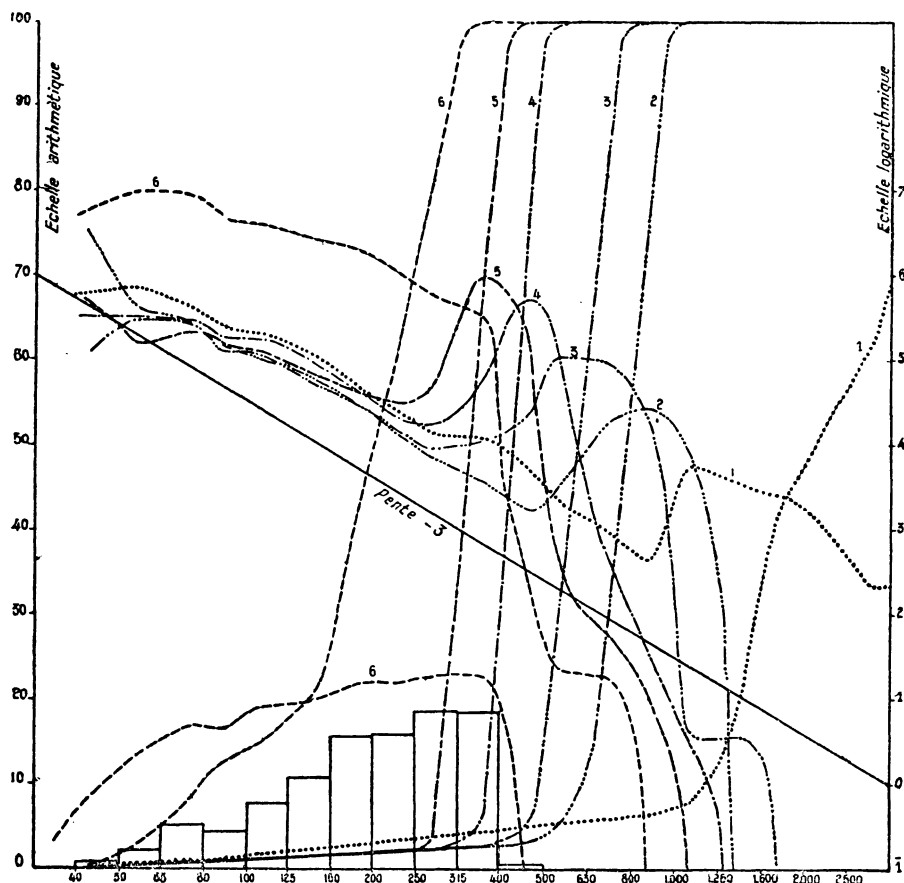


FIG. 7. — Graphiques granulométriques correspondant à six sables de l'anse de Tréhennarvour (rive ouest). Pour chaque sable, ont été figurées la courbe cumulative pondérale et la courbe bilogarithmique en nombre de grains. Pour la netteté de la figure, l'histogramme pondéral et la courbe bilogarithmique type Bagnold n'ont été représentés que pour le sable n° 6.

Le graphique de la figure 6 a été construit de la même façon pour sept sables de l'anse de Kerlut, recueillis suivant la même méthode. La ressemblance avec le précédent est frappante, et si l'on vient à les superposer on constate une parfaite coïncidence de leurs grandes lignes.

Dans l'anse de Tréhennarvour, qui pénètre plus loin dans les terres, ont été faites sur le même principe deux séries de prélèvements,

toutes deux à une centaine de mètres du débouché de l'anse sur la mer : l'une de six échantillons sur la rive ouest, l'autre de cinq sur la rive est. Les deux lignes de pente choisies convergeaient vers la partie la plus déclive de l'anse, au voisinage de ce débouché. A ces deux séries correspondent les graphiques 7 et 8, qui, eux aussi, sont superposables dans les grandes lignes aux précédents.

Ainsi, quatre séries de prises faites dans les trois anses donnent

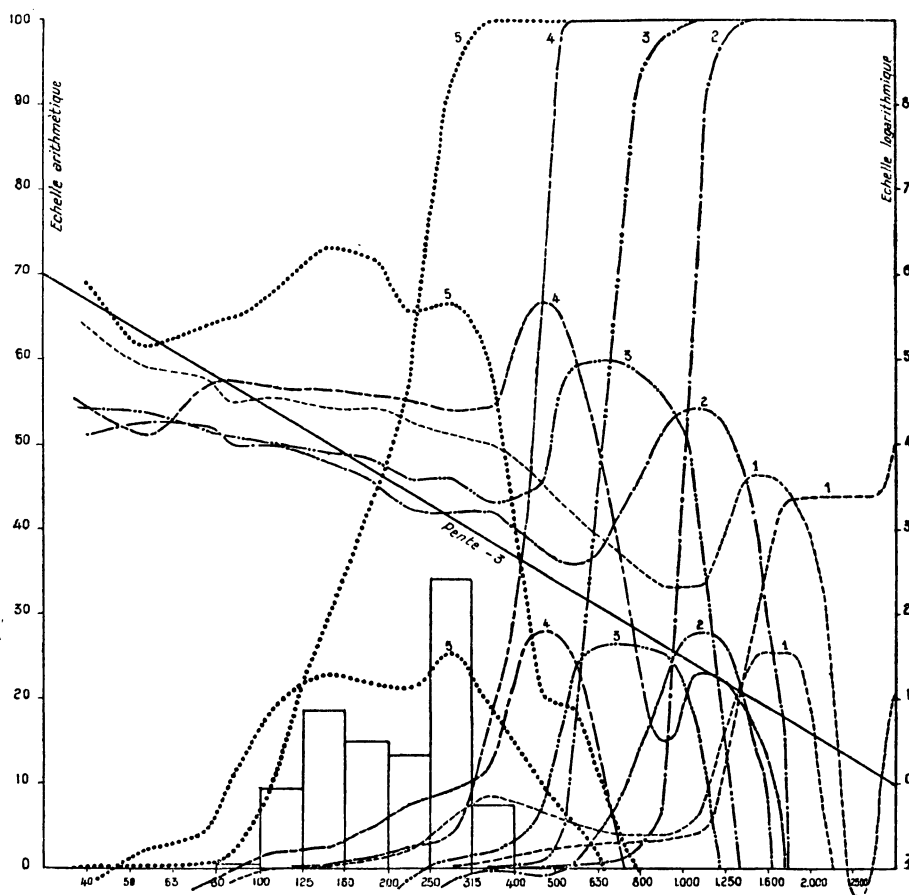


FIG. 8. — Graphiques granulométriques correspondant à cinq sables de l'anse de Tréhennarvour (rive est). Pour chaque sable, ont été figurées la courbe cumulative pondérale, la courbe bilogarithmique type Bagnold et la courbe bilogarithmique en nombre de grains. Pour la netteté de la figure, on n'a représenté qu'un histogramme (sable 5).

des résultats presque identiques, et très exceptionnels parmi toutes les granulométries dont nous disposons actuellement, y compris celles de la baie de Quiberon. On remarquera encore que, par suite des dispositions adoptées sur le terrain, chaque série débute par un sédiment (n° 1) contenant des parties très grossières qui sortent des limites du graphique, et se termine par un sédiment (n° 5, 6 ou 7, suivant le cas) relativement riche en éléments fins et très fins, mais non pas en vase véritable.

2. - Analyse des courbes

Avant d'analyser les courbes bilogarithmiques obtenues, il faut noter que, pour des raisons pratiques, les échelles choisies pour les abscisses et les ordonnées sont différentes, dans le rapport de 5 pour les abscisses à 1 pour les ordonnées. Quand on indiquera donc, par exemple, la valeur numérique d'une pente, il ne faudra pas s'étonner de la trouver représentée par une pente géométriquement cinq fois plus faible.

Dans leur forme typique, qui correspond en principe à tous les sables étudiés ici, sauf au plus inférieur de chaque série, les courbes en nombre de grains comportent chacune un minimum très net et sont divisées par lui en deux régions : à droite (éléments plus grossiers), une courbe à maximum unimodal très abrupt ; à gauche, une portion plus ou moins rectiligne, qui s'élève vers la gauche (éléments fins). Le maximum apparaît aussi dans les courbes type Bagnold ; on le reconnaîtrait dans les histogrammes, s'ils avaient été figurés pour les sables considérés ; il correspond, enfin, à la partie ascendante de la courbe cumulative.

Dans les courbes en nombre de grains, la pente qui s'élève vers le maximum est considérable. Mesurée, par exemple, directement sur le graphique pour le sable de Kernarvest, qui est sensiblement moyen à cet égard, elle est de 10, ce qui correspond (au nom de la remarque ci-dessus), à une pente numérique réelle de 50, soit à un angle voisin de 89° . La portion sableuse grossière est donc toujours exceptionnellement bien triée, ce que confirment d'ailleurs l'examen des courbes cumulatives correspondantes et le calcul des indices de classement par la classique méthode des quartiles. Les indices de classement, qui dépassent légèrement 1,5 pour les sables n° 1 de chaque série, varient en effet de 1,09 à 1,19 dans la plupart des autres cas (moyenne 1,11) et ces limites ne sont dépassées que pour les sables les plus inférieurs de Tréhennarvour, où les indices de classement atteignent 1,28 et 1,38, et que d'ailleurs nous ne considérons pas en ce moment. De toutes façons, le classement des sables entiers est très bon, et leur portion grossière, concentrée sur deux ou trois tamis au voisinage du maximum, est parfaitement définie.

Pratiquement, cette portion comprend toute la masse du sédiment, exception faite pour les sables n° 1 de chaque série qui admettent une fraction plus grossière encore, souvent importante. Ces faits sont attestés aussi par les histogrammes, et mieux par les courbes type Bagnold. La portion de sable correspondant aux éléments fins, figurée à gauche du minimum, ne représente qu'un pourcentage minime pour les sédiments autres que le plus inférieur de chaque série, et se trouve même à peu près impossible à analyser dans les figurations graphiques en ordonnées arithmétiques. Peu étudiable, même dans les courbes du type Bagnold, elle n'est vraiment explicitée que dans les courbes bilogarithmiques en nombres de grains ; mais pour que celles-ci soient valables à cet égard, il faut, nous le savons (p. 303), prendre des précautions toutes particulières lors du tamisage, effectuer ici les pesées au dixième de milligramme, et néanmoins envisager une erreur possible de 0,17 sur les ordonnées.

Si l'on tient compte de cette approximation, ces portions de courbes, dans chacun des graphiques, sont à peu près rectilignes et parallèles entre elles, au point que l'on peut déterminer des pentes moyennes approximatives : — 2,9, pour Kernarvest ; — 2,7, pour Tréhennarvour-Ouest ; — 2,4, pour Kerlut ; — 1,8, pour Tréhennarvour-Est. A l'exception de cette dernière, les pentes sont assez voisines les unes des autres, et les plus fortes en valeur absolue approchent de 3, fait sur la signification duquel on reviendra. Ces courbes se terminent souvent, vers les éléments les plus fins, par une partie descendante, mais il faut noter que, dans cette région, les erreurs peuvent être importantes.

Nous avons réservé jusqu'ici les courbes n° 5 de Kernarvest, 7 de Kerlut, 6 de Tréhennarvour-Ouest et 5 de Tréhennarvour-Est, correspondant aux niveaux inférieurs dans les trois anses, car elles ont des caractères spéciaux. Non seulement leur médiane est particulièrement faible, et la charge en éléments fins ou très fins est 10 à 100 fois plus forte que dans les autres (différence d'ordonnées de 1 à 2 unités), mais encore au-delà (vers les fins) de leur maximum le plus grossier, elles en présentent un second très rapproché (Kerlut 7, Tréhennarvour-Est 5) ou même le minimum interposé se trouve supprimé et l'on a affaire à une sorte de palier assez régulièrement ascendant vers la gauche du graphique, jusqu'à un maximum fin plus ou moins éloigné. Mais on ne peut douter des homologues de ces courbes avec les précédentes, en raison de la continuité des déformations de leurs tracés, et en raison aussi de la pente très abrupte qui définit ces courbes vers la droite, et qui est tout à fait comparable à celle des graphiques de sables provenant des hauts niveaux. La pente en question, à Kerlut, est la plus faible de toutes, et cependant, elle atteint encore la valeur numérique de 10, correspondant à un angle voisin de 85°.

3. - Premières interprétations

On peut commenter comme suit cet ensemble de faits :

1° Tous les sédiments dont il s'agit ici comportent dans leur structure une masse de grains plus ou moins grossiers suivant le cas et remarquablement bien classés, correspondant au maximum commun de toutes les représentations. Ils prédominent énormément dans la masse du sédiment et lui forment certainement une sorte de charpente structurale, à laquelle contribuent, dans les sables n° 1 (les plus élevés des trois anses) des grains plus grossiers encore.

2° L'excellent classement de ces grains prédominants, surtout dans les sables des niveaux intermédiaires, indique une grande stabilité des conditions hydrodynamiques de leur tri. La sériation très régulière des courbes dans chacune des trois anses, quand on va des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs, avec diminution régulière de la médiane et du calibre des grains prédominants montre que ces conditions hydrodynamiques varient régulièrement dans le même sens. Tout ceci exclut sans doute les actions turbulentes de quelque ampleur.

3° Du maximum au minimum, dans tous les sédiments étudiés, sauf celui du niveau le plus inférieur dans chaque série, le nombre de grains tombe brusquement (pente de la courbe de l'ordre de 50)

dans le rapport de 10 à 1, ou même de 100 à 1, après quoi il se relève lentement vers les éléments fins. On a donc toutes raisons d'admettre qu'à partir du minimum, les éléments fins sont réduits à ceux qui sont logés dans les interstices des gros et sont ainsi protégés contre l'ablation ; autrement dit, qu'un sable de ce type est structuré selon deux phases : l'une grossière formant un réseau presque continu, l'autre dispersée dans les mailles du réseau. La limite naturelle et objective entre ces deux phases est donnée par le diamètre des grains correspondant au minimum de la courbe en nombre de grains ; et dans un cas de ce genre tout au moins, ce diamètre a bien plus d'importance pour la structure du sédiment que n'importe quel autre diamètre plus ou moins arbitrairement choisi : même celui de la médiane. Mais ceci ne se voit pas dans les représentations classiques semi-logarithmiques, où les ordonnées relatives aux éléments peu abondants sont écrasées et difficiles à analyser, ni même dans les courbes bilogarithmiques du type Bagnold, où le minimum ne se traduit pas clairement.

4° On a fait remarquer déjà que les portions de courbes situées à gauche du minimum ont souvent une allure presque rectiligne avec, pour chacune de nos quatre séries, une pente moyenne propre, qui varie de — 1,8 pour Tréhennarvour-Est à — 2,9 pour Kernarvest. On a, de plus, comparé ces pentes à la pente — 3. La considération particulière de celle-ci résulte d'une constatation très banale, dont Thoulet (1900) n'avait cependant pas cru inutile de souligner l'intérêt en sédimentologie.

Si l'on suppose une masse donnée d'une même matière représentée en divers échantillons par des grains de diamètres différents mais uniformes pour chaque échantillon, le nombre de ces grains varie évidemment en raison inverse du cube des diamètres. Dans le système de coordonnées de nos courbes, cette variation se traduirait par une droite de pente — 3. Si donc, une portion de courbe avait justement cette pente, cela signifierait qu'il n'y a aucun tri dans l'intervalle considéré. Si la portion de courbe a une pente plus forte *en valeur absolue*, c'est qu'il y a accumulation croissante à mesure que le calibre des grains diminue. Si, au contraire, la pente est plus faible que — 3 en valeur absolue, il y a ablation croissante dans le même sens : c'est le cas de tous les sédiments envisagés ici, mis à part ceux des niveaux inférieurs. On peut ajouter que l'ablation, à peu près nulle à Kernarvest, est au maximum à Tréhennarvour-Est, parmi les quatre séries étudiées. Quant à la façon dont elle se fait, l'analyse de nos courbes ne permet pas d'en décider à elle seule. On peut songer, soit à un entraînement par filtration de l'eau, soit à un lavage du sédiment brassé, modérément d'ailleurs, par l'eau qui trie les éléments grossiers avec la perfection que l'on sait. Ces considérations ne s'appliquent pas aux stations les plus inférieures, où les teneurs en grains fins sont bien plus fortes et qui, on va le voir, sont proches de la saturation, par ces grains fins, des mailles du réseau.

4. - Essai d'évaluation des espaces poreux

On a montré (p. 314), que, dans le calcul actuel, on s'expose à une erreur minime en considérant les grains comme sphériques. Or,

il est généralement admis que, dans un sable où les grains sont de taille homogène, ils peuvent, suivant le degré de tassement, occuper les uns par rapport aux autres diverses positions intermédiaires entre ce que Pettijohn (1949) a appelé les dispositions cubique et rhomboédrique : la première étant celle où les sphères fictives représentant les grains ont pour centre les coins d'un cube, tandis que la seconde est celle où les sphères en question ont pour centres ceux d'un rhomboèdre. Il est facile de calculer que, dans le premier cas, les espaces poraux laissés libres entre les sphères tangentes occupent 47,64 pour 100 du volume total, tandis que, dans l'arrangement rhomboédrique, le rapport de ces volumes tombe presque au tiers. On peut aller plus loin et calculer, avec Graton et Fraser (1935), que, dans ces vides, qui comportent des élargissements et des étranglements réguliers, le diamètre minimum et le diamètre maximum sont les suivants, rapportés au diamètre des grains sphériques (1) :

disposition cubique : de 0,414 à 0,732 ;

disposition rhomboédrique : de 0,154 à 0,225.

Le cas actuel est favorable à un essai d'évaluation de l'espace poral principal, formé par les mailles laissées entre les grains grossiers, et de son encombrement par les grains fins : donc, de la porosité réelle du sédiment.

Dans nos diverses courbes (exception faite pour les stations inférieures), la région maximale s'étend sur un, deux ou au plus trois tamis, et la différence d'abscisses entre maximum et minimum correspond elle-même à un ou deux tamis. On conclut facilement de là, le rapport des mailles d'un tamis au suivant étant 1,26, que les grains du minimum ont un diamètre qui varie de 0,4 à 0,8 de celui des grains du maximum : la disposition des grains grossiers ne peut donc pas ici être rhomboédrique ; par contre, ces données répondent bien à l'hypothèse d'un arrangement cubique. Mais, d'autre part, le nombre de grains au minimum varie suivant les cas entre un dixième et un soixantième du nombre de grains au maximum (différence d'ordonnées variant entre 1 et 1,6), de sorte que les espaces poraux ne sont occupés par ces grains que pour une faible part.

Pour les mêmes sédiments des stations intermédiaires et supérieures, on est au-dessus de la vérité, nous l'avons vu, en adoptant — 3 pour pente de la courbe à gauche du minimum. Or, avec la pente — 3, chaque tamis porterait une masse et un volume de grains égaux à ceux du minimum, et pour avoir l'encombrement total des espaces poraux, il suffirait de multiplier les données précédentes (1/10 à 1/60) par le nombre des tamis intéressés, qui varie suivant le cas de 8 à 15. Si l'on tient compte de la pente réelle de ces portions de courbes, toujours plus petite que — 3 et atteignant parfois — 1,8, et si l'on considère que dans les sédiments 1, où cette proportion de courbe est la plus longue, il y a une proportion importante de grains plus grossiers encore que ceux du maximum, on voit qu'en aucun de ces cas, les espaces poraux ne sont saturés d'éléments plus fins. Il est

(1) Je remercie Mme Debyser d'avoir bien voulu me signaler d'après ses mesures faites à Arcachon, que sur la haute plage, en sable peu tassé, le volume des vides s'accorde avec l'hypothèse d'un arrangement cubique, tandis que sur la basse plage, où le tassement est plus marqué, on tend vers un arrangement rhomboédrique.

possible d'ailleurs, à l'aide des courbes, de faire des supputations plus précises si l'on a assez confiance dans la précision des courbes elles-mêmes. Pour la courbe I de Kernarvest, prise comme exemple, on arrive ainsi à ce résultat que les interstices sont occupés au tiers seulement, tout au plus.

Considérons maintenant les sédiments des niveaux inférieurs. Leurs courbes représentatives n'admettent pas le minimum normal (Kernarvest 5 et Tréhennarvour-Ouest 6) ; ou ne le montrent qu'avec une ampleur très faible (Kerlut 7 et Tréhennarvour-Est 5), si bien qu'en général il ne reste plus d'espaces vides suffisants pour abriter tous les éléments plus fins, et qu'on atteint la saturation ou du moins qu'on en approche. Il serait possible, mais peu intéressant pour le moment, de traiter la question plus en détail sur chaque courbe particulière. Il vaut mieux se borner ici à quelques remarques graphiques simples :

a) La parallèle à l'axe des abscisses, menée par le maximum, définit pour chaque tamis un nombre de grains égal à ce maximum ; et comme chacun des grains, de tamis en tamis, se trouve justement occuper, dans l'échelle A.F.NOR., à peu près moitié de l'espèce poral restant, on arrive approximativement à la saturation. On peut parvenir, par un autre raisonnement graphique, à un résultat très voisin : le comblement total des vides, s'il pouvait être achevé par les éléments les plus fins, le serait en un point d'ordonnée supérieure de 0,28 à celle du maximum ; cela correspond, dans nos cas de figure, à une pente moyenne insignifiante de $-0,035$ (angle de 2° avec l'axe des abscisses) ;

b) Au-dessus de cette limite qui répond à la saturation des vides de la disposition cubique, l'accroissement de la proportion d'éléments fins ne peut se faire que par écartement plus ou moins marqué des grains grossiers qui cessent de former une charpente continue. Une donnée importante de la discussion est fournie dans cette région par la droite de pente -3 passant par le maximum. Nous savons qu'elle définit, entre l'ablation et le dépôt des éléments fins, une relation particulière, analogue à celle qui caractérise le maximum. En fait, les quatre courbes considérées ici sont indépendantes de cette droite, et trois d'entre elles sont entièrement situées au-dessous d'elle, la quatrième la dépassant de peu et très localement. De cette remarque, on retiendra simplement ici que dans cette zone, il y a en général tri par prépondérance de l'ablation. On verra dans d'autres mémoires qu'il en est presque toujours ainsi, sauf quand des éléments franchement vaseux engluent les portions fines et les retiennent. L'allure précise de cette branche de courbe varie d'une de nos anses à l'autre, sans doute en fonction de caractéristiques hydrodynamiques locales, faisant apparaître parfois des maxima et des minima secondaires dont les emplacements peuvent varier. Sauf peut-être pour Tréhennarvour-Ouest, ce tracé semble sans rapport avec celui des courbes de niveaux plus élevés, où les vides ne sont pas saturés.

5. - Rapports des courbes entre elles

On a noté déjà que, pour une même série de prises, les courbes des stations supérieures et moyennes, où les éléments fins sont tous

interstitiels, montrent entre elles un certain parallélisme dans leurs portions correspondant à ces éléments fins. Le parallélisme s'étend même à Tréhennarvour-Ouest, à la courbe n° 6, de la station la plus inférieure.

En ce qui concerne les maxima, ils s'alignent assez exactement sur une droite, tout au moins pour les stations intermédiaires : Kerlut 2, 3, 4 et même 5 ; Kernarvest 2, 3, 4, 5 et même 1 ; Tréhennarvour-Est 2, 3 et 4 ; Tréhennarvour-Ouest 2, 3, 4, 5. La pente de la droite ainsi tracée est voisine de -3 , sauf en ce dernier cas où elle atteint $-4,5$. Le fait que le maximum des courbes 1 est souvent très au-dessous de cette droite, est sans doute lié à l'existence fréquente ici de portions de tamisage plus grossières encore, qui n'entrent pas dans le maximum. Quant à l'alignement rectiligne des maxima de nos courbes, il a exactement même signification que le parallélisme des courbes cumulatives et l'ordonnée maximale commune des courbes de Bagnold. Les minima ne s'alignent pas de même, mais le font suivant des courbes assez régulières, concaves vers le haut.

Si l'on souligne ici ces divers points, c'est qu'on les retrouvera plus tard, sur une échelle bien plus étendue, quand on aura à comparer les granulométries au long des côtes bretonnes.

On peut remarquer, enfin, que les courbes bilogarithmiques en nombres de grains fournissent aux discussions de structure et aux rapprochements comparatifs des possibilités que, malgré tous leurs mérites, les courbes classiques ne donnent pas toujours, en raison de l'écrasement, en ordonnées arithmétiques, des pourcentages d'éléments fins et grossiers. Les courbes type Bagnold elles-mêmes, qui n'ont pas ce défaut, ont celui de converger pratiquement à gauche vers l'axe des abscisses et, de ce fait, d'éliminer toute considération de pente dans une région particulièrement délicate du graphique.

6. - Discussion

Ce qui précède a été tiré uniquement de l'étude granulométrique. Il est temps de le rapprocher des observations faites sur place, bien que celles-ci soient déjà anciennes et n'aient pas été aussi poussées qu'on pourrait le désirer. Elles sont rapportées pour la plus grande part dans mon mémoire de 1932 ; mais j'utiliserai également ici quelques notes prises à cette époque et non publiées.

a) Il faut souligner tout d'abord la situation géographique et la configuration des anses en question. Elles sont situées (fig. 9) au fond de la baie de Quiberon, baie relativement plate pour son étendue et bien protégée par la pointe de Quiberon et la ligne que forment les roches de la Teignouse et les îles de Houat et Haedic, abritée en outre par Belle-Ile au large du passage de la Teignouse. A plus courte distance encore, les anses de Tréhennarvour et de Kerlut sont protégées à nouveau par l'alignement de la pointe de Menar-Bellec et des roches de Méaban. Ces anses, de plus, entaillent assez longuement les terres et sont relativement étroites. Celle de Tréhennarvour, par exemple, est presque trois fois plus longue que large, et se trouve assez encaissée par la côte rocheuse vers son entrée, alors qu'elle n'a pas plus de 400 à 500 mètres de large. La moins abritée des trois anses serait

celle de Kernarvest, échancrure moins marquée, deux fois moins large, quatre fois moins longue, et ouverte exactement à l'ouest de Menar-Bellec. Or, c'est précisément de Menar-Bellec que, dans mon mémoire

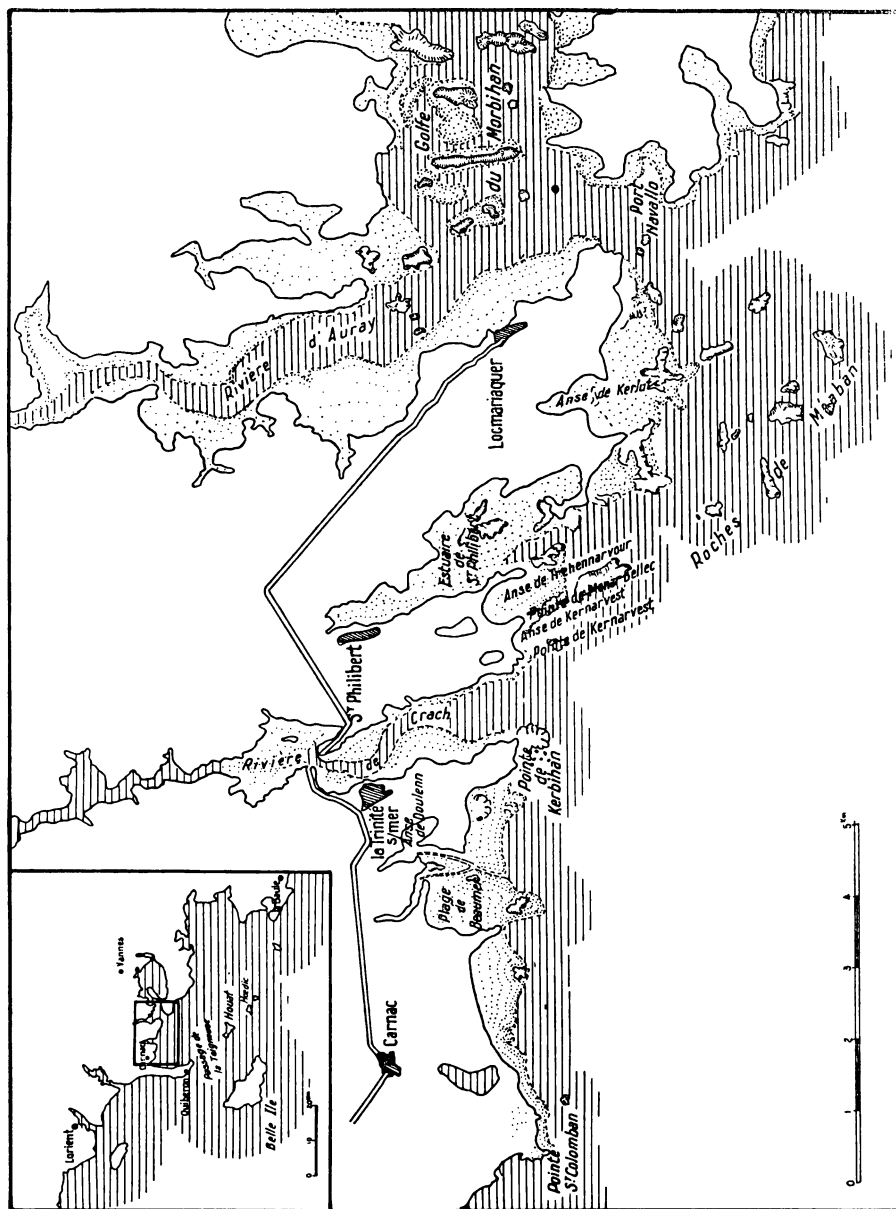


FIG. 9. — Croquis du fond de la baie de Quiberon, indiquant les stations mentionnées.

de 1932, j'avais fait une limite importante dans les côtes de la baie, au point de vue de la protection.

Le complément d'étude granulométrique actuel peut modifier

légèrement ce point de vue, car il met en évidence une grande similitude entre les trois anses, avec des caractères si particuliers que je ne les ai retrouvés nulle part ailleurs, ni en baie de Quiberon, ni dans toute mon enquête actuelle. Il s'agit : d'une part, de la délimitation exceptionnelle nette du maximum granulométrique (surtout traduit en nombres de grains) ; d'autre part, de la gradation parfaitement régulière des granulométries dans chacune des quatre séries de prises ; et, enfin, de l'identité presque complète entre ces quatre séries. Si ces faits m'avaient échappé autrefois, c'est sans doute faute d'un mode de représentation adéquat.

Les caractères ci-dessus, de précision et de régularité du tri, suggèrent, avons-nous dit, une turbulence très faible, une absence presque complète de houle et de vagues, corroborée par la situation et la conformation des trois anses. On peut concevoir en ce cas les mouvements comme à peu près réduits au va-et-vient de la marée, comparables, à une toute autre échelle, aux oscillations régulières données à l'eau dans l'écuelle d'un laveur de sables aurifères, et capables, comme elles, d'amener un roulement de la masse de grains sur le fond.

b) Le second point à examiner est celui des matériaux en jeu. Les anses dont il s'agit sont creusées dans des roches métamorphiques où domine la granulite et qui fournissent en abondance des produits de décomposition. Le tri se fait donc à partir de ces arènes, dont se rapprochent encore beaucoup les sables n° 1 des quatre séries ; mais, je n'ai suivi ce tri qu'en ce qui concerne les calibres de grains, sans apporter grande attention jusqu'à présent à la nature de ceux-ci, mis à part certains enrichissements locaux en micas. Mais la turbulence est insuffisante pour mettre en suspension une masse significative de grains d'autre nature. A cette constance au cours du tri, on peut rapporter sans doute l'alignement à peu près rectiligne des maxima de nos courbes, sur une pente souvent voisine de — 3, indiquant pour l'ensemble de la station une équivalence approximative entre l'apport et l'ablation.

J'avais signalé dès 1932, à Tréhennarvour surtout, la présence fréquente de coquilles qui d'ailleurs, comme dans toute la baie, ne donnent guère de fragments durables, de sorte qu'il y a peu de calcaire dans les fractions fines et moyennes du tamisage. J'ai noté plus spécialement depuis lors, dans le sable n° 1 de Tréhennarvour-Ouest, une remarquable abondance de coquilles de *Bittium reticulatum* Da Costa, retenues de façon précise sur les tamis de 2.500 à 1.600 μ correspondant au maximum : ces coquilles y forment 60 pour 100 de la masse totale, le reste étant issu de la granulite. On a ainsi une occasion concrète d'appliquer le calcul de correction exposé p. 319. Cette correction est :

$$\log n' - \log n = \log \left(c^3 \sigma' + 2,65 \frac{p_2}{p_1} \right) - \log c^3 \sigma - \log \left(\frac{p_2}{p_1} + 1 \right)$$

On sait que, pour les *Bittium*, c^3 est en moyenne 0,9. La densité des coquilles est un peu inférieure à celle de l'aragonite, 2,96. p_2/p_1 est ici 60/40 ou 1,5. On trouve donc une correction de — 0,0014 tout au plus. On comprend ainsi que la courbe 1 de Tréhennarvour-Ouest ait exactement même allure que les courbes 1 des autres séries, où la masse des grains grossiers est fournie uniquement par le tri

des arènes : les *Bittium* s'y substituent exactement à des éléments de celles-ci. Du même coup, se trouve résolue par la négative, dans ce cas particulier, la question parfois discutée : quand un graphique granulométrique n'est pas unimodal, n'est-ce pas dû à la séparation par le tamisage de grains de diverses natures. Ici, en tous cas, l'existence d'un maximum et d'un minimum dans notre courbe n'a rien à voir avec la présence ou l'absence de *Bittium*.

Tout comme les éléments de la granulite, les coquilles de *Bittium* sont autochtones et, suspensions de micas mises éventuellement à part, il ne semble pas y avoir ici d'échanges importants avec l'ensemble de la baie. D'autre part, si l'on excepte les produits du ruissellement, il n'y a pas non plus d'apports terrigènes. Alors que toute cette région est encadrée par deux rivières assez importantes et productrices de vase (celle de Crach et celle d'Auray), alors qu'elle est divisée, entre Tréhennarvour et Kerlut, par l'estuaire de Saint-Philibert, qui reçoit aussi de la vase d'un petit cours d'eau, les trois anses dont il s'agit n'ont pas d'apport de ce genre, fût-ce d'un ruisseau notable ; leurs sédiments sont donc pauvres en vraie vase, ce qui facilite certainement le tri de leurs éléments et donne lieu (avec le brassage par les mouvements de la marée) aux granulométries exceptionnellement nettes qu'on sait.

c) Le sable de Tréhennarvour, comme celui de Kerlut, est pourtant mou et de couleur sombre, presque noire. Le pied s'y enfonce fortement, et la première impression, sur le terrain, est celle d'un sable très nettement vaseux. Nous savons qu'elle est fausse et que la proportion de vase est nulle ou très faible. La consistance particulière du sol est due certainement à la disposition des grains en réseau cubique à peu près parfait, qui a été établie plus haut, et qui permet de considérables déformations par pressions. Je renvoie à mon mémoire de 1932 pour information sur les variations locales, et notamment sur les différences entre Tréhennarvour-Est et Ouest. Quoi qu'il en soit, l'enrichissement en éléments fins, vers les bas niveaux, avait plusieurs conséquences : le sédiment y était beaucoup plus ferme et plus fixé, moins sujet à rouler sous l'action du flux et du reflux. Corrélativement, il était occupé, à l'époque, par des herbiers de *Zostères*, qui divisaient longitudinalement l'anse en deux. Même là, les éléments fins ne sont pas assimilables à de la vase et, on le voit, ont un tout autre effet sur la consistance du sédiment. Ils résultent certainement du lessivage, superficiel et par percolation, des sédiments supérieurs et de l'accumulation dans une zone où la capacité de filtration est réduite par bien des causes. Parmi celles-ci, retenons seulement la granulométrie. On sait que dans la construction des filtres à sable, on fait intervenir un facteur pratique que Allen Hazen (1892) a nommé « grandeur effective » (cf. Wautier, 1947) : il s'agit d'un diamètre tel que la masse du sable soit, dans la proportion de 10 pour 100, faite de grains plus petits. Déterminée pour Tréhennarvour et Kerlut d'après nos données, la grandeur effective varie régulièrement de 1.200 μ environ (en haut de nos séries) à 140 ou même 80 en bas. Pour Kernarvest, elle varie dans un rapport analogue, de 1.500 à 150 μ . Si l'on ajoute que la cote au-dessus du niveau de basse mer est bien plus faible aussi, on comprend que la vitesse de percolation est doublement réduite, aux niveaux inférieurs, ce qui diminue l'en-

traînement des grains interstitiels, abaisse encore la grandeur effective, et accélère le processus d'engorgement du sédiment.

A Kernarvest, le sable a même consistance, mais n'a pas d'apparence faussement vaseuse, car il est blanc et semblable d'aspect à beaucoup d'autres sables à Ophélies. Les *Ophelia bicornis* Sav. y sont abondantes en effet ; et ceci pose la question générale de l'importance directe que peut avoir la granulométrie sur l'écologie. A Tréhennarvour et à Kerlut, les faunes endogées ne comprennent pas d'Ophélies, mais, avec des nuances locales, diverses espèces énumérées dans mon mémoire de 1932, et dont les plus caractéristiques sont *Phascolosoma elongatum* Kef. et les trois *Tapes* courants, *T. decussata* L., *T. pullastra* Mont., et *T. aurea* Gmelin. Les granulométries, on l'a vu, sont peu différentes, et le facteur écologique discriminant est sans doute en rapport avec l'état de la matière organique, avec son degré d'oxydation, et ainsi, de façon indirecte, avec la couleur même des sédiments, si opposée dans les deux cas.

Au total, les informations locales dont nous disposons s'accordent bien avec les résultats de l'étude granulométrique actuelle. Sans doute serait-il désirable d'étendre les unes et les autres par une nouvelle investigation sur les mêmes anses. Après trente ans, celles-ci peuvent avoir été modifiées, soit par l'intervention humaine, soit par des causes naturelles, au premier rang desquelles, il faut citer la disparition provisoire mais générale des Zostères vers 1932. Il serait nécessaire d'autre part, de généraliser et de préciser le réseau des prélèvements d'échantillons, d'étudier ceux-ci au point de vue de l'air et de l'eau interstitiels, de la teneur en matière organique, voire de la circulation d'eau. Il faudrait encore étudier de plus près la faune endogée et spécialement la microfaune interstitielle et voir notamment sur les exemples échelonnés et tout spécialement schématiques fournis par ces anses, si son abondance et sa composition sont en rapport avec la vitesse et la régularité de la filtration dans les sables de granulométries diverses. Ce programme est ample et assez difficile à réaliser pleinement sur une portion de côte éloignée des laboratoires maritimes existants, mais les trois anses étudiées n'en sont pas moins remarquablement adaptées à lui par les particularités locales de leurs sédiments.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Après avoir, dans ce mémoire, discuté du point de vue de l'écologiste les techniques du tamisage granulométrique et la figuration de ses résultats, on a développé la présentation d'un type nouveau de courbes granulométriques (courbes bilogarithmiques en nombres de grains) et discuté la valeur de ces courbes. Sans prétendre en rien supplanter les figurations classiques, de telles courbes semblent pouvoir, en certains cas, apporter des caractérisations plus aisées, mieux adaptées aux besoins écologiques, et permettre des discussions plus poussées de la structure des sédiments intercotidaux.

Appliquant ce mode de représentation, avec d'autres, à trois anses

particulièrement abritées de la baie de Quiberon, on y a reconnu des types granulométriques à peu près superposables, et très différents des types courants : il s'agit de courbes à maximum brutalement tranché correspondant à une charpente structurale de grains grossiers très prédominants par leur masse, les interstices de ces grains bien calibrés ne logeant en général (sauf aux niveaux inférieurs) qu'une faible quantité d'éléments fins. Pour une même série de prélèvements

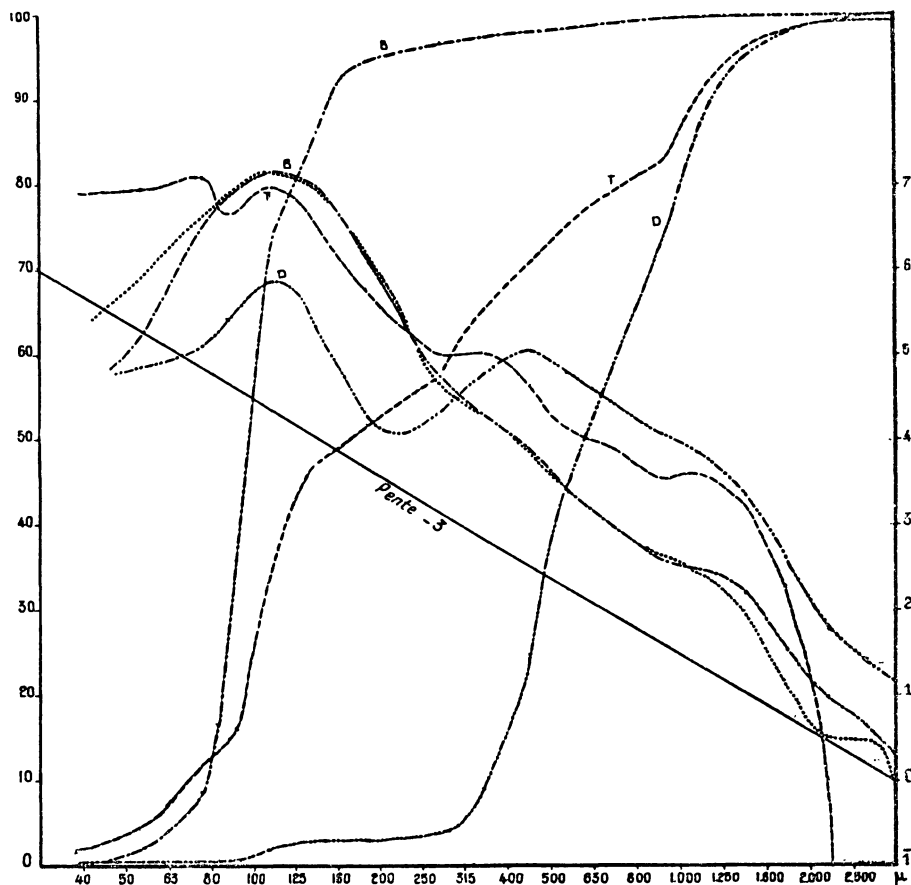


FIG. 10. — Graphiques granulométriques correspondant à trois sables de la baie de Quiberon (parages de La Trinité). Pour chaque sable, ont été figurées la courbe cumulative pondérale et la courbe bilogarithmique en nombre de grains.

B, sable à *Solen* et *Leptosynapta* de la plage de Beaumer ; D, sable à Arénicoles de l'anse de Douleonn (très fermée et très abritée) ; T, sable à Arénicoles voisin de l'herbier de La Trinité. Pour le sable B, ont été tracées, pour comparaison, les courbes bilogarithmiques en nombre de grains, calculée (traits et points) et obtenue par comptage (ponctuée).

étagés, les maxima s'échelonnent régulièrement, et ce n'est que vers les niveaux inférieurs que la proportion d'éléments fins s'accroît sensiblement.

Si l'on compare les courbes en question à celles qu'il m'a été donné de publier déjà selon le même mode de construction (1958 ; et Bobin

et Prenant, 1959), on constate de très grandes différences. Ces dernières courbes (Locquirec, et Kercaniou près Morgat) ont trait à des plages exposées au large, où l'action de la houle et des vagues prédomine de beaucoup sur celle des courants. Les courbes étudiées ici sont relatives, au contraire, à des anses à turbulence très faible, où le tri des sédiments se fait à peu près exclusivement par les mouvements réguliers de la marée. Entre les unes et les autres, existent bien des intermédiaires.

On peut en trouver une série dès la baie de Quiberon. Nous avons choisi, pour cette baie, et réuni dans la figure 10 quelques courbes relatives aux environs de La Trinité-sur-Mer, qui montrent une série de tels intermédiaires. Le premier exemple de ce mémoire, d'autre part, a été volontairement pris à Roscoff, au banc du Loup, dans le chenal de Batz (figure 1), et l'on ne peut manquer de noter quelque ressemblance avec l'un des types (Doulenn) choisis à La Trinité. Tous deux ont aussi des analogies avec ceux de nos trois anses, avec cette différence immédiatement frappante, toutefois, que les maxima y sont bien moins abrupts, donc le tri des grains bien moins précis. Des comparaisons de ce genre, étendues à des centaines d'échantillons et portant sur un grand nombre de points des côtes bretonnes, seront publiées prochainement et permettront de définir quelques règles dans la diversité des sédiments.

Ce n'est pas faire tort aux courbes granulométriques classiques, établies pondéralement et en ordonnées arithmétiques, qu'accorder à l'emploi simultané de celles-ci le mérite d'un complément de précision. Or, on a vu, par l'opposition entre les faunes de Kernarvest d'une part, de Tréhennarvour et de Kerlut d'autre part, que cette différence bionomique était compatible avec des granulométries à peu près identiques. J'ai signalé déjà (1932) des faits analogues dans la comparaison des sables fins, de part et d'autre de la pointe de Quiberon, et j'en signalerai d'autres encore en envisageant par exemple, d'un côté les sables de Saint-Michel-en-Grève et ceux de la baie de Douar-nenez, d'autre part la plage de Siec près de Roscoff. On ne peut s'étonner de constater que l'importance écologique de la granulométrie ne soit pas exclusive ; mais le sédiment et ses interstices sont les supports de tant de propriétés du biotope que de toutes façons l'étude granulométrique requiert la plus grande précision.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- BAGNOLD, R.A., 1954. — The physic of blown sand and desert dunes. *Londres, Methuen, édit.*, 265 p., 16 pl., 84 diagrammes.
- BERTHOIS, L., 1946. — Recherches sur les sédiments du plateau continental atlantique. *Ann. Inst. Océanogr.*, 23, pp. 1-64.
- BERTHOIS, L., 1949. — Remarques sur la statistique granulométrique dans l'étude des sables. *Circulaires du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques*, n° 3, nov. 1949.
- BERTHOIS, L., 1950. — Granulométrie comparée de quelques sables marins. *Bull. Soc. Sc. Bretagne*, 25, pp. 31-62.

- BERTHOIS, L. et c., 1951. — Note sur la précision des tamisages mécaniques. *Bull. Soc. Géol. France*, (6), 1, p. 87.
- BERTHOIS, L. et c., 1954. — Remarques sur la granulométrie de la plage de Saint-Quay. *Bull. Soc. Linn. Normandie*, (9), 7, p. 30.
- BERTHOIS, L. et AUBERT, M., 1949. — Recherches expérimentales sur les erreurs dues au tamisage. *Bull. Soc. Sc. Bretagne*, 24, pp. 81-86.
- BERTHOIS, L. et AUBERT, M., 1950. — Remarques sur l'influence de la durée du tamisage dans les analyses granulométriques. *Ann. Ecole Nat. Agric. Rennes*, 13, pp. 167-187.
- BERTHOIS, L. et AUBERT, M., 1950. — Remarques sur la détermination de la composition minéralogique d'un sable par comptage de grains. *Ann. Ecole. Nat. Agric. Rennes*, 13, pp. 189-195.
- BERTHOIS, L. et AUBERT, M., 1954. — Triage différentiel des minéraux dans les sables de plages. *Bull. Soc. Linn. Normandie*, (9), 7, pp. 52-58.
- BIETLOT, A., 1941. — Méthodes d'analyses granulométriques. Applications à quelques sables éocènes belges. *Mém. Soc. Géol. Belgique*, 64, fasc. 2, pp. 81-170.
- BLANG, J.-J., 1958. — Recherches de sédimentologie littorale et sous-marine en Provence occidentale. *Thèse, Paris, Masson, édit.*
- BOBIN, G. et PRENANT, M., 1960. — *Electra verticillata* (Ellis et Solander, 1786), Lamouroux, 1816 (Bryozoaire Chilostome). *Cah. Biol. Mar.*, 1 (2), pp. 121-156, 11 fig., 1 pl.
- BOILLOT, G., 1960. — La répartition des fonds sous-marins au large de Roscoff (Finistère). *Cah. Biol. Mar.*, 1 (1), pp. 3-23.
- BOURCART, J., 1937. — Sur la possibilité de déterminer l'origine d'un ensablement par l'étude des courbes de fréquences granulométriques. *C.R. Soc. Géol. France*, 17 fév. 1937, pp. 49-50.
- BOURCART, J., 1941. — Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles. *Bull. Soc. Géol. France*, (5), 11, pp. 117-153.
- BOURCART, J., 1959. — Cours de pétrographie sédimentaire. Les sédiments, les roches sédimentaires et leur genèse. *Paris, C.D.U., édit.*
- BOURCART, J. et FRANCIS-BŒUF, C., 1939. — Sur la véritable signification des sables vaseux et des vases sableuses. *C.R. Ac. Sc. Paris*, 209, p. 568.
- BOURCART, J. et FRANCIS-BŒUF, C., 1942. — La vase. 1 vol., *Paris, Hermann, édit. Actualités Scientifiques et Industrielles.*
- BOURCART, J., FRANCIS-BŒUF, C. et RAJCEVIC, R., 1941. — Sur le mécanisme de sédimentation des vases dans les estuaires. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 213, p. 1507.
- BRAJNIKOV, B., 1944. — Sur l'importance de la granulométrie pour l'étude quantitative des dépôts lourds dans un sédiment. *Bull. Soc. Géol. France*, 1944, p. 381.
- BRAJNIKOV, B., FRANCIS-BŒUF, C. et ROMANOVSKY, V., 1943. — Technique d'études des sédiments et des eaux qui leur sont associées. 1 vol., *Paris, Hermann, édit., Actualités Scientifiques et Industrielles.*
- CAILLEUX, A., 1937. — Analyseur hydraulique pour sables. *C.R. somm. Soc. Géol. France*, 19 avril 1937, pp. 92-94.
- CAILLEUX, A., 1943. — Distinction des sables marins et fluviatiles. *Bull. Soc. Géol., France* (5), 13, pp. 125-138.
- DELAMARE-DEBOUTTEVILLE, CL., 1960. — Biologie des eaux souterraines littorales et continentales. 1 vol., *Paris, Hermann, édit., Actualités Scientifiques et Industrielles*, 1280, 740 pp., 254 fig.
- DOEGLAS, J., 1946. — Interpretation of the results of mechanical analyses. *Journ. Sed. Petr.*, 16, p. 19.
- DOEGLAS, J., 1955. — Progress of regional sedimentology. *Proc. of the fourth World petroleum Congress, Sect. I/D, Reprint I*, pp. 418-426.
- FRANCIS-BŒUF, C., 1947. — Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaires. *Thèse Paris, Masson, édit., et Ann. Inst. Océanogr.*, 23, pp. 150-344.
- GESSNER, H. 1936. — L'analyse mécanique. Tamisage, sédimentation, lévitation. *Dunod, Paris*. Traduit de l'allemand par Buffle.
- GLANGEAUD, L., 1938. — Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde. Caractères pétrographiques des formations fluviatiles, saumâtres, littorales et néritiques. *Bull. Soc. Géolog. France* (5), 8, pp. 599-630.
- GLANGEAUD, L., 1941. — Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments. *Bull. Soc. Géolog. France* (5), 11, pp. 371-388.

- GLANGEAUD, L., 1951. — Observations sur le triage granulométrique des sédiments le long des plages à marées. *Sédimentation et Quaternaire. C.R. Congrès Charente et Dordogne*, 1949, pp. 95-110.
- GUILCHER, A., 1948. — Le relief de la Bretagne méridionale de la baie de Douarnenez à la Vilaine. *Thèse*.
- GULINCK, M., 1941. — Sur la précision des analyses granulométriques par tamisage. *Bull. Soc. Belge Géol.*, 52, pp. 206-213.
- HUMPHREYS, D.W., 1956. — Some problems of size and sorting in sands. *Geol. Magaz.*, 93, pp. 491-504.
- KRUMBEIN, W.C. et PETTIJOHN, F.J., 1938. — Manual of sedimentary petrography. *Appleton Century, New York et Londres*.
- LAFON, M., 1953. — Recherches sur les sables côtiers de la Basse-Normandie et sur quelques conditions de leur peuplement zoologique. *Ann. Inst. Océanogr. (N.S.)*, 28, fasc. 3.
- LEFÈVRE, P. et LUCAS, G., 1955. — Etude de quelques sédiments marins des environs de Concarneau (Finistère). *Bull. Inst. Océanogr. Monaco*, n° 1062, 35 p., 6 fig., 1 pl.
- LUCAS, G. et LEFÈVRE, P., 1956. — Contribution à l'étude de quelques sédiments marins et de récifs d'Hermelles du Mont-Saint-Michel. *Rev. Trav. Inst. Pêches Maritimes*, 20, fasc. 1, pp. 85-112, 2 fig.
- LUCAS, G. et ROSFELDER, A., 1957. — Emploi d'un dièdre de verre en analyse granulométrique. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 244, p. 1942.
- PETTIJOHN, F.J., 1949. — Sedimentary rocks. *Harper and Bs, New York*, 526 p., 131 fig., 40 pl.
- PRENANT, M., 1932. — L'analyse mécanique des sables littoraux et leurs qualités écologiques. *Arch. Zool. Expér. Gén.*, 84, pp. 581-595, 7 fig.
- PRENANT, M., 1932. — Etudes de bionomie intercotidale. La baie et la pointe de Quiberon. *Trav. Stat. Biol. Roscoff*, fasc. 10, pp. 35-103, 26 fig.
- PRENANT, M., 1934. — Contribution à l'étude écologique des sables littoraux. *C.R. somm. Soc. Biogéogr.*, 11, pp. 17-19.
- PRENANT, M., 1936. — Sur quelques types de sables littoraux. *C.R. somm. Soc. Biogéogr.*, 13, pp. 1-3.
- PRENANT, M., 1936. — Notes bionomiques sur le littoral de la baie de Douarnenez. *C.R. somm. Soc. Biogéogr.*, 13.
- PRENANT, M., 1939. — Etudes de bionomie intercotidale. La baie de Douarnenez et ses abords. *Bull. Biolog. France-Belgique*, 73, pp. 451-476.
- PRENANT, M., 1955. — Position des maxima caractéristiques dans les graphiques granulométriques de fréquence établis pour les sables de la zone des marées sur les côtes bretonnes. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 241, pp. 1062-1065.
- PRENANT, M., 1958. — Ecologie des sables intercotidaux et traduction approximative des données granulométriques en nombre de grains. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 246, pp. 1582-1585.
- RIVIÈRE, A., 1937. — Contribution à l'étude géologique des sédiments sableux. *Ann. Instit. Océanogr. (N.S.)*, 17, fasc. 4, pp. 213-240.
- RIVIÈRE, A., 1937. — L'interprétation rationnelle des spectres de tamisage des sédiments sableux et la signification géologique des diagrammes. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 204, p. 441.
- RIVIÈRE, A., 1937. — La constitution granulométrique des sédiments sableux et les grandes lignes de leur évolution dans les différents milieux géologiques. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 204, p. 703.
- RIVIÈRE, A., 1944. — Sur les méthodes granulométriques de sédimentation. *Bull. Soc. Géolog. France* (5), 14, pp. 409-437.
- RIVIÈRE, A., 1952. — Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles. Interprétation des courbes et applications. *Bull. Soc. Géolog. France* (6), 2, pp. 145-154.
- RIVIÈRE, A., 1952. — Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Indices caractéristiques et interprétation géologique. Notion de faciès granulométrique. *Bull. Soc. Géolog. France* (6), 2, pp. 155-167.
- RIVIÈRE, A., 1953. — Méthode d'interprétation de la granulométrie des sédiments meubles. *Revue Inst. Franç. Pétroles et Annales des Combust. liquides*, 8.
- RIVIÈRE, A., 1954. — Généralisation de la méthode des faciès granulométriques. Evaluation de la dispersion aléatoire. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 238, pp. 2326-2328.
- RIVIÈRE, A., 1957. — Sur la notion de dispersion littorale. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 240, p. 1920.

- RULLIER, F., 1957. — Teneur en air et en eau interstitiels des sables marins et son influence sur les conditions de l'habitat. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 245, pp. 936-938.
- RULLIER, F., 1959. — Etude bionomique de l'Aber de Roscoff. *Trav. Stat. Biolog. Roscoff (N.S.)*, 10, 350 pp.
- SOURIE, R., 1957. — Etude écologique des plages de la côte sénégalaise aux environs de Dakar (Macrofaune). *Ann. Ecole Sup. Sciences Dakar*, 3, pp. 1-110, 20 fig.
- THOULET, J., 1900. — Analyse mécanique des sols sous-marins. *Ann. des Mines* (9), 17, pp. 401-447.
- THOULET, J., 1912. — Mémoires de lithologie marine. *Ann. Inst. Océanogr.*, 3, 1912, 41 pp.
- TRICART, J. et CAILLEUX, A., 1953. — Détermination du centile en granulométrie. *Bull. Soc. Géolog. France* (3), n^{os} 7-8, p. 747.
- TWENHOFFEL, W.H. 1926. — Treatise on sedimentation. *Londres*, 1926.
- VATAN, A., 1949. — La pétrographie comme moyen d'étude du transport des sables et des galets sur les côtes. *Rev. génér. Hydraulique*, n^o 54, pp. 302-307.
- WAUTIER, J., 1947. — Contribution à l'étude du peuplement d'un milieu particulier : le filtre à sable submergé. *Thèse Paris*, 1947.