

Différentes définitions techniques de la forme des galets

Different technical definitions of pebble shape

PAR R. DURAND

INGÉNIEUR AUX ETABLISSEMENTS NEYRPIG

English synopsis p. 217

Nous avons été amenés, au cours d'études sur l'entraînement des matériaux par l'eau, à considérer l'influence de la forme de ces matériaux sur les lois qui régissent leur mouvement dans les fluides.

Dans cette première communication, nous avons simplement voulu faire l'examen des divers coefficients de forme actuellement définis afin de pouvoir choisir ensuite en connaissance de cause les mieux adaptés à chaque problème envisagé.

L'étude de la forme des galets intéresse l'hydraulicien à divers titres : vitesses d'entraînement, vitesse de chute, stabilité des plages et des digues en enrochements à la mer, écoulements en milieux poreux.

Elle intéresse également d'autres catégories de chercheurs que nous avons consultés :

- De façon générale, toute personne ayant à effectuer des *analyses mécaniques* et qui se préoccupe de la validité et de la signification de ses mesures.
- Les géologues qui examinent l'usure des galets pour en déduire les modes de transport successifs au cours des temps.
- Les techniciens *des bétons* qui se préoccupent de l'adhérence des liants aux agrégats, de la coulabilité et de la compacité des bétons.
- Les spécialistes de *mécanique des sols* qui étudient la porosité, la perméabilité et la cohésion des sols.

Lorsqu'il s'agit de définir la forme d'un galet

ou d'un grain naturel quelconque, il vient naturellement à l'esprit de le comparer à une sphère ou à un ellipsoïde. Ceux-ci sont en effet, parmi les diverses formes idéales simples, les seuls qui ne comportent pas d'angles vifs et qui tiennent compte par conséquent du phénomène naturel de l'usure. Par suite, les coefficients de forme s'efforcent en général d'établir une comparaison avec une sphère ou un ellipsoïde de référence.

Nous distinguerons d'abord, parmi l'ensemble de ces coefficients de forme, ceux qui caractérisent le grain isolé en lui-même, indépendamment de sa situation dans un ensemble ou dans un écoulement. Nous appellerons de tels coefficients, coefficients « intrinsèques » de forme. Il s'agit de coefficients véritables, c'est-à-dire sans dimensions. On peut ensuite pour chaque technique particulière être amené à définir des coefficients spéciaux. Le grain ne sera plus considéré isolément mais en relation avec d'autres grains ou avec un fluide en mouvement. Il s'agira par exemple d'un coefficient caractérisant la position d'un galet sur le terrain pour le géologue ou du coefficient de traînée caractérisant la résistance aux déplacements du grain dans un fluide pour l'hydraulicien ou l'aérodynamicien. Bien souvent ces coefficients ne seront pas sans dimensions. Ainsi, la perméabilité est une vitesse fictive. Nous nous attacherons plus spécialement à l'étude des coefficients spéciaux définis en hydraulique.

De même nous nous intéresserons de préférence aux graviers et galets, c'est-à-dire aux grains supérieurs à 2 mm.

CHAPITRE I

ÉTUDE DES COEFFICIENTS "INTRINSÈQUES" DE FORME

Nous distinguerons encore, parmi les coefficients « intrinsèques », trois classes suivant que les grandeurs intervenant dans ces coefficients auront été mesurées suivant des droites, dans un plan ou dans l'espace.

Les grandeurs mesurables suivant une direction, grandeurs dites du premier ordre, sont les dimensions droites mesurées au pied à coulisse, au palmer ou au microscope avec micromètre.

Les mesures dans un plan, ou du second ordre, nécessitent la projection du contour apparent du grain suivant une direction choisie. Cette projection peut être réalisée au jugé ou à la chambre claire. On pourra alors effectuer les mesures suivantes : rayons de courbure, angles si le contour apparent affecte une allure polygonale, périmètre et surface intérieure.

Les mesures dites dans l'espace ou du troisième ordre sont des mesures de poids ou de volume effectuées à la balance. Elles peuvent donc être très précises si les grains sont assez gros.

Les coefficients correspondants seront dits du premier, du second ou du troisième ordre. Ils représentent le grain de façon d'autant plus complète et complexe à la fois qu'ils seront d'un ordre plus élevé.

1° Coefficients du premier ordre

Nous admettrons que les trois dimensions principales du grain sont toutes définies comme étant les plus grandes longueurs mesurables entre deux plans, parallèles entre eux, et pouvant être parallèles eux-mêmes à une ou plusieurs directions données.

Nous reviendrons plus loin sur la validité de ces définitions.

Soit L , la longueur, qui est la plus grande dimension mesurable entre deux plans parallèles.

Soit L' , la largeur, qui est la dimension normale à la direction de L .

Soit L'' , l'épaisseur, qui est la dimension normale à la fois aux directions de L et de L' .

Les trois segments correspondants ne sont pas nécessairement concourants. La longueur peut être mesurée facilement et avec une précision

suffisante. Par contre, il n'est pas toujours aisé de déterminer pratiquement la direction suivant laquelle doivent être mesurés L' ou L'' si le grain est trop petit pour pouvoir être tenu commodément à la main. Par observation au microscope, on ne peut en effet étudier que des positions d'équilibre stables du grain sur un plan et ces directions ne coïncident pas nécessairement avec celles de L' et de L'' .

On appelle diamètre moyen D_m le diamètre de la sphère ayant même volume que l'ellipsoïde ayant pour axes L , L' et L'' .

$$D_m = \sqrt[3]{L \times L' \times L''}$$

Coefficient d'aplatissement ou flatness ratio.

WENTWORTH, WADELL et CAILLEUX définissent l'aplatissement ainsi :

$$\frac{L + L'}{2L''} \geq 1$$

en fait, il varie de 1,05 à 10 d'après CAILLEUX.

On peut utiliser (Mc NOWN) un coefficient d'aplatissement correspondant à une moyenne géométrique de la forme :

$$\frac{L''}{\sqrt{L \times L'}} \leq 1$$

Coefficient de dissymétrie.

Si C est le point où le plan contenant L'' coupe L et si A est l'extrémité de L la plus éloignée de C , CAILLEUX appelle dissymétrie le rapport :

$$0,5 < \frac{AC}{L} < 1$$

Pratiquement, il varie entre 0,5 et 0,85.

La notion d'aplatissement peut varier suivant que l'on fait intervenir deux ou trois dimensions (étude en plan ou en volume) et suivant que l'on tient ou non compte de la dissymétrie du grain.

CAILLEUX utilise ainsi un coefficient d'aplatissement en section $\frac{L}{L''_s}$. L'épaisseur L''_s est alors la plus grande épaisseur normale à L et peut différer de L'' .

Indice granulaire.

La norme autrichienne Onorm B 3102 définit l'indice granulaire (Kornindex) comme étant le rapport de la longueur L à l'épaisseur E mesurée dans le plan médiateur de L. Cette épaisseur E n'est donc égale à L'' que si la dissymétrie est de 0,5.

Modules d'allongement et d'aplatissement.

K. WALZ mesure L et L'. Il mesure en fait l'épaisseur e au milieu de L et normalement à L et à L', mais pour simplifier nous continuerons à désigner l'épaisseur par L''. Il considère les rapports $\frac{L'}{L''}$ et $\frac{L}{L''}$. En portant en abscisses $\frac{L}{L''}$ et en ordonnées $\frac{L'}{L''}$, on obtient le graphique de la figure 1. Les limites sont constituées par les droites SA et SD. Le point S correspond à la sphère et les directions A et D respectivement aux aiguilles et aux disques. On peut distinguer quatre zones I, II, III, IV, qui caractérisent la tendance à la sphéricité et deux autres zones séparées par la droite SM qui distinguent les allongés et les aplatis.

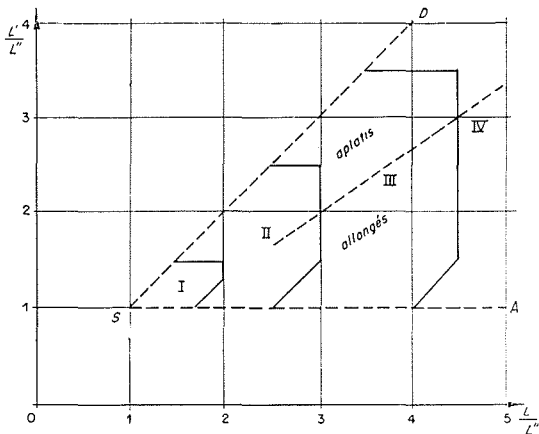


FIG. 1. — DIAGRAMME DE K. WALZ

M. A. H. D. MARKWICK définit le module d'aplatissement par $\frac{L''}{L'}$ et le module d'allongement par $\frac{L}{L'}$. Il considère comme aplatis les grains pour lesquels $\frac{L''}{L'} < 0,6$ et comme allongés ceux pour lesquels $\frac{L}{L'} > 1,8$.

Il nous semble préférable de prendre comme terme de comparaison commun la largeur et d'adopter pour les modules les définitions de H. HEYWOOD, c'est-à-dire module d'aplatissement

égal à $\frac{L'}{L''}$ et module d'allongement égal à $\frac{L}{L'}$. En adoptant ces définitions, les deux modules sont supérieurs ou égaux à l'unité.

Si l'on porte en abscisses $n = \frac{L}{L''}$ et en ordonnées $m = \frac{L'}{L''}$ à la manière de K. WALZ, le point S de la figure 2 représente la sphère, et

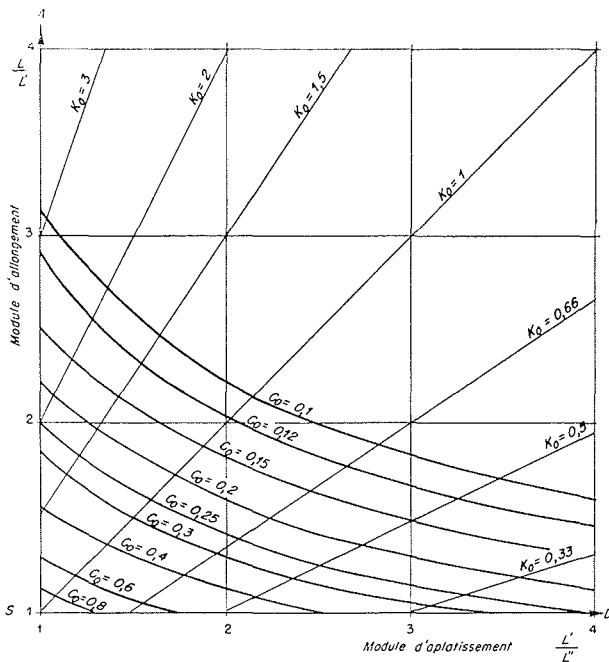


FIG. 2.

les directions A et D l'aiguille et le disque. La droite S, de pente unité, passant par S et pour laquelle $K_0 = \frac{LL''}{L'^2} = 1$, sépare le quadrant en deux régions :

- la région supérieure correspond à $K_0 > 1$ et aux grains allongés,
- la région inférieure correspond à $K_0 < 1$ et aux grains aplatis.

A une valeur donnée de K_0 correspond une droite passant par l'origine de pente K_0 . Le point correspondant à un grain dans le diagramme des modules définit ainsi son ellipsoïde de référence.

En résumé, pour définir l'aplatissement avec un seul coefficient, on prendra :

- soit l'aplatissement en section de CAILLEUX ou l'indice granulaire qui ne nécessitent que deux mesures,
- soit l'aplatissement de WADELL ou celui de Mc NOWN qui en nécessitent trois.

Si l'on veut distinguer entre l'aplatissement et

l'allongement, on utilisera les modules d'HEYWOOD et le coefficient K_0 .

2° Coefficients du second ordre

Les mesures sont faites sur le contour apparent du grain projeté dans la direction normale à L et L' (contour apparent principal). Souvent ce contour principal correspond à la position d'équilibre la plus stable du galet. Pour les grains fins, dont l'observation doit se faire au microscope, cette définition est d'ailleurs la seule possible.

a) Coefficients d'arrondi.

Ces coefficients font intervenir les rayons de courbure du contour apparent. On mesure généralement le plus petit rayon de courbure. On ne considère pas les petits détails correspondants à l'état de surface (grains constitutifs pour les quartzites ou petites cavités résultant du départ d'un éclat sur les silex). On rapporte ensuite le double de ce rayon à une dimension caractéristique du grain. On obtient, suivant la dimension de référence :

— *Roundness de COX & WENTWORTH* :

$$\frac{2r_1}{D_m}$$

— *Indice d'émoussé de CAILLEUX* :

$$\frac{2r_1}{L}$$

— *Roundness de WADELL* :

$$\frac{2r_1}{D}$$

avec D plus grand cercle inscrit dans le contour apparent; D correspond souvent pour les galets roulés à la largeur.

WADELL & CAILLEUX mesurent également les rayons de courbure supérieure à r_1 . WADELL peut ainsi distinguer jusqu'à 7 rayons principaux sur un contour apparent. Il prend alors la moyenne pour N rayons de courbures et appelle plus précisément roundness

$$R = \frac{2 \sum (r)}{D \cdot N}$$

TESTER définit par ailleurs un coefficient pour les grains à allure polygonale qui semble difficile à déterminer avec précision.

b) Coefficients de circularité.

Pour le contour apparent, on peut encore mesurer :

- L et L' , la longueur et la largeur déjà définies,
- s , la surface du cercle de diamètre L ,
- p , le périmètre du contour apparent,
- s_0 , la surface du contour apparent.
- D_0 , le diamètre du cercle de surface s_0 ,
- p_0 , le périmètre du cercle de surface s_0 .

Avec ces six grandeurs, les différents auteurs ont pu définir des coefficients dits de « circularity » ou de « sphericity ».

$$\text{Coefficient de COX : } 4n \frac{s_0}{p^2}.$$

$$\text{Coefficient de TICKELL : } \frac{s_0}{s}.$$

Coefficient de HEYWOOD et de MARKWICK :

$$z = \frac{s_0}{LL'}.$$

$$\text{Coefficients de WADELL : } \frac{p_0}{p} \text{ et } \varphi = \frac{D_0}{L}.$$

Pour des grains de quartz d'allure sphérique, WADELL mesure φ suivant différents contours apparents, et la moyenne φ_m lui semble peu différente de la « true sphericity » ψ définie elle-même par :

$$\psi = \frac{S_0}{S}$$

avec :

S_0 , surface latérale de la sphère de même volume,
 S , surface réelle du grain.

S n'est pas une grandeur pratiquement mesurable et il faut remarquer que φ est un rapport de longueurs et ψ un rapport de surfaces. La notion de φ moyen nous semble donc présenter peu d'intérêt.

3° Coefficients du troisième ordre

Tous ces coefficients sont basés sur la mesure du poids et par conséquent du volume du grain.

La norme AFNOR P-18 301 désigne par coefficient volumétrique C le rapport du volume V du grain au volume de la sphère circonscrite, c'est-à-dire ayant pour diamètre la longueur L ; et par

coefficient volumétrique moyen C_m , le rapport du volume absolu total de N grains à la somme des volumes des sphères ayant pour diamètre la longueur des grains.

$$C_m = \frac{\sum V}{\sum \frac{\pi L^3}{6}}$$

HEYWOOD appelle « volume constant » k , le rapport du volume V de la particule à D_0^3 , volume du cube ayant pour arête D_0 .

$$k = \frac{V}{D_0^3}$$

ANDREASEN définit un coefficient égal à :

$$\frac{1}{3\sqrt{k}} = \frac{D_0}{3\sqrt{V}}$$

MARKWICK appelle « volume ratio » :

$$\frac{V}{LL'L''}$$

et « prismoïdal ratio » :

$$\frac{V}{s_0 L''}$$

Soit D_n le diamètre nominal, c'est-à-dire le diamètre de la sphère ayant même volume que le grain :

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

MARKWICK appelle « surface constante » σ le rapport :

$$\sigma = \frac{L'}{D_n}$$

FERET appelle par ailleurs volume relatif K_m le volume moyen de N grains rapporté à la moyenne des volumes des sphères traversant juste les passoires ou les deux mailles ayant servi à isoler la catégorie de grains considérée. Ce coefficient ne peut s'appliquer qu'à des matériaux tamisés.

En ce qui concerne la mesure du coefficient volumétrique moyen pour des grains fins, si l'on opère sur un nombre de grains limité, la pesée est peu précise; si l'on opère sur un nombre important, la méthode devient fastidieuse étant donné le grand nombre de mesures de L au microscope à effectuer.

Pour des matériaux classés, la notion de volume relatif est aisée à déterminer puisqu'il suffit de compter les grains.

CHAPITRE II

EMPLOI DU DIAGRAMME DES MODULES

Les dimensions principales du grain peuvent être définies de différentes façons.

Nous distinguerons les dimensions L, L', L'' qui correspondent au plus grand parallélépipède circonscrit, et les dimensions l, l', l'' qui correspondent au plus petit parallélépipède circonscrit.

Pour les ellipsoïdes et les galets roulés en général, l'écart entre les deux définitions est nul ou négligeable. Il devient important pour les blocs anguleux et pour le cube ou les parallélépipèdes.

Un autre point de vue est celui de l'équivalence entre les dimensions définies entre plans parallèles et les dimensions définies par analyse mécanique (tamis à maille carrée ou rectangulaire, fentes, passoires).

L'écart est également nul pour la sphère et l'ellipsoïde, faible en général pour les cailloux roulés et grand pour les concassés et les polyèdres.

Après avoir fait ces remarques, nous allons maintenant préciser la notion de forme. WADELL

estime que, pour avoir une bonne image du galet, il faut examiner à la fois "sphericity" ou "circularity" et "roundness".

MARKWICK distingue également entre « shape » et « form ». Dans le même esprit, nous parlerons d'allure et d'arrondi. L'allure implique l'idée d'allongement et d'aplatissement plus ou moins grand. L'arrondi permet de distinguer les galets roulés des blocs anguleux concassés.

Nous allons voir comment, sur le diagramme des modules que nous avons choisi, on peut caractériser l'allure et l'arrondi.

L'allure du galet sera définie par les valeurs des modules d'allongement et d'aplatissement n et m .

La pente de la droite joignant le point de coordonnées n et m à l'origine est :

$$K_0 = \frac{LL''}{L^2}$$

Le coefficient K_0 devient, si l'on multiplie numérateur et dénominateur par $\frac{\pi}{6} L'$, le rapport du volume de l'ellipsoïde de référence ayant pour axes L, L', L'' , au volume de la sphère ayant pour diamètre L' , c'est-à-dire pratiquement le volume de la sphère passant juste à la passoire qui définit le grain.

Soient alors :

K_0 = volume relatif de l'ellipsoïde de référence,

K = volume relatif vrai d'un grain isolé,

K_m = volume relatif vrai moyen d'un ensemble de grains déjà définis,

C_0 = coefficient volumétrique de l'ellipsoïde de référence,

C = coefficient volumétrique vrai d'un grain isolé déjà défini,

C_m = coefficient volumétrique moyen d'un ensemble.

Comme $C_0 = \frac{LL'L''}{L^3}$, on en tire :

$$m = \frac{l}{\sqrt{C_0 n}}$$

Remarquons que C_0 varie davantage avec l'allongement qu'avec l'aplatissement.

On peut graduer le diagramme en courbes d'égal K_0 et d'égal C_0 . Si l'on peut déterminer la valeur de K ou de C , le rapport $\frac{K}{K_0}$ ou $\frac{C}{C_0}$ pourra caractériser l'arrondi du grain.

Remarquons que $\frac{K}{K_0}$ et $\frac{C}{C_0}$ sont l'un et l'autre le « volume ratio » de MARKWICK :

$$V_0 = \frac{V}{LL'L''}$$

On peut par suite considérer indifféremment l'un ou l'autre.

Comme l'a déjà fait WALZ, on peut distinguer dans le diagramme différentes zones correspondant à des familles de galets. Par exemple, nous avons pu constater que les galets du Rhône à Donzère se placent dans une bande axée sur la droite $K_0 = 1$.

CHAPITRE III

APPLICATIONS AUX DIFFÉRENTES TECHNIQUES

Pour l'étude expérimentale de l'influence des facteurs de forme sur un phénomène, on peut choisir des galets presque identiques et ne différenciant entre eux que par un seul de ces coefficients. Les galets seront alors mesurés par les méthodes déjà indiquées.

Pour l'application de ces lois à un échantillon naturel complexe, qui nécessite des mesures statistiques sur un grand nombre de grains, il faut faire appel à des procédés de classement mécaniques.

On ne peut malheureusement pas mesurer la longueur par des procédés mécaniques simples. L'emploi de tamis à mailles carrées ou de passoires à orifices circulaires permet de classer l'échantillon en plusieurs catégories dont chacune est constituée de grains ayant sensiblement la même largeur. En analysant ces catégories grâce à un système de fentes de largeurs différentes permettant la mesure de l'épaisseur, on peut définir des modules d'aplatissement moyens.

Le diamètre D_0 défini par tamisage à la passoire diffère souvent de la largeur que nous

avons primitivement définie. HEYWOOD signale que le diamètre statistique de MARTIN se rapprocherait davantage de D_0 que L' . MARTIN considère la largeur suivant la droite passant par le centre de gravité de l'aire projetée.

Enfin, la valeur du vide de maille carrée laissant passer le même grain que la passoire D_0 est une fonction à préciser du module d'aplatissement.

GÉOLOGIE

Le géologue cherche à déduire de la forme du galet et de sa position par quel processus il a été amené sur le terrain. C'est grâce au phénomène d'usure qu'il peut déterminer si le grain est d'origine marine, fluviale, éolienne, etc... On s'efforcera d'établir une comparaison avec une sphère de référence ou un ellipsoïde. L'idéal serait de comparer la surface réelle du grain à celle de la sphère de même volume. La mesure de la surface réelle étant impossible, on doit se

contenter de l'étude dans le contour apparent principal, d'où les différents coefficients de circularité. Une autre voie de recherches est orientée vers la mesure des rayons de courbure.

On pourrait peut-être utiliser des coefficients volumétriques basés sur une mesure de poids tels que $\frac{K}{K_0}$ ou $\frac{C}{C_0}$.

TRAVAUX PUBLICS

Pour l'étude des bétons, on se préoccupe de la rondeur pour l'adhérence du liant à l'agrégat, et de l'allure pour la coulabilité. Pour les chaussées empierrées, on s'intéresse principalement aux grains concassés et peu aplatis.

On considère toujours de grandes quantités de matériaux, de sorte que l'on est obligé, pour considérer des valeurs moyennes, de faire appel systématiquement à l'analyse mécanique.

MÉCANIQUE DES FLUIDES

L'hydraulicien considère toujours le grain en mouvement relatif par rapport à un fluide. On peut donc penser que les coefficients les mieux adaptés à ce sujet seront les coefficients de volume du troisième ordre.

Nous distinguerons les cas suivants :

a) *Ecoulements en milieux poreux :*

Le coefficient de perméabilité K de la formule de DARCY est une vitesse fictive qui dépend du fluide et de la forme des grains. L'indice des vides peut également constituer un facteur de forme.

b) *Tenue d'une plage, de massifs d'enrochements naturels et de blocs artificiels à la mer :*

La stabilité d'une plage ou d'une digue à la houle est fonction des caractéristiques locales de la houle et de son incidence, de l'angle du talus et du poids et de la forme des constituants. On a pu constater par des essais que l'on pouvait nettement améliorer la stabilité en jouant sur la forme d'enrochements artificiels.

c) *Vitesses d'entraînement :*

On peut distinguer plusieurs vitesses d'entraînement :

1. Vitesse d'entraînement sur fond lisse;

2. Vitesse d'entraînement sur fond rugueux constitué par des matériaux analogues (HJULSTROM);

3. Vitesse d'entraînement pour des massifs en pierres lancées (Théorie d'ISBACH et BLANCHET).

Pour chacune de ces vitesses il faut faire intervenir un facteur de forme différent. En effet, l'entraînement sur fond lisse est un phénomène de glissement ou de roulement. L'entraînement sur fond rugueux comporte un pivotement.

d) *Vitesses de chute :*

Lorsqu'un grain isolé de maître couple S a atteint sa vitesse limite W dans un fluide indéfini, de masse spécifique ϱ , il y a équilibre entre son poids apparent P_a et la traînée :

$$P_a = C_x \varrho S \frac{W^2}{2}$$

Le coefficient C_x ainsi défini, appelé coefficient de traînée, varie avec le nombre de REYNOLDS $\frac{WD}{\nu}$ (D , diamètre du grain et ν , viscosité cinématique du fluide). Il est sans dimensions.

Pour de faibles nombres de REYNOLDS et pour des sphères, on a $C_x = \frac{24}{R}$ qui correspond à la loi de STOKES. Pour des nombres supérieurs de REYNOLDS compris entre 10^3 et 10^5 , C_x reste pratiquement constant. Mc NOWN a étudié le coefficient de traînée des ellipsoïdes et de corps artificiels de forme géométrique aux faibles nombres de REYNOLDS. Il est amené à définir le coefficient K , rapport de la traînée réelle du corps considéré à la traînée fictive de la sphère ayant même volume et même vitesse de chute. K est également le rapport de la vitesse de chute de la sphère de même volume à la vitesse de chute du corps.

On appelle diamètre équivalent D_e d'un grain le diamètre de la sphère ayant même vitesse limite de chute W .

D_e est différent du diamètre nominal D_n qui est, rappelons-le, celui de la sphère de même volume. $\frac{D_e}{D_n}$ peut constituer un facteur de forme.

Nous avons nous-mêmes été amenés à étudier les vitesses de chute et le coefficient de traînée de galets roulés du Rhône en vue de leur refoulement en conduite. Nous avons pu constater que le coefficient volumétrique C était suffisant pour déterminer la valeur de C_x . Ceci implique qu'une certaine relation existait entre les coefficients de forme de ces galets. On peut donc, dans ce cas, tracer des courbes d'égal C_x sur le diagramme des

modules. Nous envisageons de compléter cette étude pour d'autres types de galets et pour des sables dans le cadre d'une étude entreprise pour les Ponts et Chaussées de la Loire-Inférieure.

CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons essayé de classer les coefficients intrinsèques de forme en trois classes suivant la nature des mesures à effectuer. On peut distinguer l'allure du galet et son arrondi. L'allure peut être mesurée grâce à des rapports de longueurs appelés modules d'aplatissement et d'allongement.

La position du point représentatif du galet dans le diagramme des modules représente directement l'allure du grain, et le classe dans une famille. Le diagramme associé au grain un ellipsoïde de comparaison de mêmes axes.

L'arrondi pourra être caractérisé, grâce à une mesure de volume, par l'écart entre un coefficient volumétrique du grain et le coefficient volumétrique de l'ellipsoïde.

Nous espérons que ce travail de documentation pourra donner quelques idées directrices pour l'étude physique des propriétés des sables et des galets en hydraulique.

NOTATIONS

Pour donner plus de clarté à l'exposé, nous avons désigné arbitrairement par la même lettre les grandeurs qui étaient désignées différemment par plusieurs auteurs.

L = longueur maxima.

L' = largeur maxima perpendiculaire à L .

L'' = épaisseur maxima perpendiculaire à L et L' .

L''_s = épaisseur maxima perpendiculaire à L .

E = plus petite épaisseur dans le plan médiateur de L .

e = épaisseur au milieu de L perpendiculairement à L et à L' .

r_1 = plus petit rayon de courbure du contour apparent principal.

D = plus grand cercle inscrit dans le contour apparent principal.

S = surface du cercle de diamètre L .

p = périmètre du contour apparent principal.

S_0 = surface du contour apparent principal.

D_0 = diamètre du cercle de surface S_0 .

p_0 = périmètre du cercle de surface S_0 .

m = module d'allongement.

n = module d'aplatissement.

D_0 = diamètre de passoire.

D_e = diamètre équivalent de la sphère de même vitesse de chute.

D_n = diamètre nominal de la sphère de même volume.

C_0 = coefficient volumétrique de l'ellipsoïde de comparaison.

C = coefficient volumétrique mesuré.

C_m = coefficient volumétrique mesuré moyen.

K_0 = volume relatif de l'ellipsoïde de comparaison.

K = volume relatif mesuré.

K_m = volume relatif mesuré moyen.

BIBLIOGRAPHIE

Nous présenterons à part les références bibliographiques des géologues et des spécialistes de bétons et de mécanique des sols, qui présentent peu d'auteurs communs et semblent souvent s'ignorer.

GÉOLOGIE.

ANDERSON. — The rate of wear of Sand Grains. *Journal of Geology*, Vol. 34 (1926), pp. 144-158.

BOURCART. — Essai d'une classification des matériaux meubles. Extrait du *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5^e série, T. XI, année 1941.

CAILLEUX (A.). — Indice d'émoûssé. Définition et première application. Extrait du *C.R.S. de la Société Géologique de France*, séance du 10 nov. 1947, p. 251.

CAILLEUX (A.) et BOUILLET (Geneviève). — Indice d'émoûssé des galets de quartz. Extrait du *C.R.S. de la Société Géologique de France*, séance du 24 janvier 1949, p. 35.

CAILLEUX (A.) et BOUILLET (Geneviève). — Indice d'émoûssé du silice. Extrait du *C.R.S. de la Société Géologique de France*, séance du 10 mai 1948, p. 1947.

CAILLEUX (A.). — La disposition individuelle des galets dans les formations détritiques. *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique*, 1938, Vol. XI, fasc. 3, pp. 171-198.

CAILLEUX (A.). — Distinction des galets marins et fluviaux. Extrait du *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5^e série, T. XV, année 1945.

CARTHY (Mac). — The rounding of beach sands. *American Journal Sci.*, Vol. CCXV (1933), pp. 205-224.

COX (E. P.). — A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleon.*, Vol. I (1927), pp. 179-183.

LAMAR (T. E.). — Geology and economic resources of the St. Peter Sandstone of Illinois. *Ill. Geol. Sur. Bulletin*, 53, 1927, pp. 148-151.

MACKIE. — On the laws that govern the rounding of particles of sand. *Trans. Edin. Geolog. Society*, Vol. VII (1893-1898), p. 299-311.

MARSHALL (P.). — The wearing of beach gravels. *Trans. New Zealand Inst.*, Vol. LVIII (1927), pp. 507-532.

SINGH (Harbans). — "Roundness" and "Sphericity" as used in analysis of sand particles. *The central board of irrigation journal*, March 1950, p. 163.

- TESTER (A.). — The measurement of the shapes of rock particles. *Journal Sedim. Petrology*, Vol. I, 1931, pp. 3-11.
- TICKELL (F. G.). — *The examination of fragmental rocks*. Stanford University press (1931).
- WADELL (H.). — Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, July-August 1932, Vol. XL, n° 5, pp. 443-451.
- WADELL (H.). — Sphericity and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, April-May 1933, Vol. XLI, n° 3, pp. 310-331.
- WADELL (H.). — Volume, shape and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, April-May 1935, Vol. XLIII, n° 3, pp. 250-280.
- WENTWORTH. — The shapes of pebbles. *United States Geological Survey*, Bulletin 730 C, 1922, pp. 91-114.
- WENTWORTH. — The shapes of beach pebbles. *United States Geological Survey. Professional paper*, 131 C, pp. 75-83.

BÉTON ET MÉCANIQUE DES SOLS.

- ANON. — Proposed standard specification for concrete aggregates and for mixing water. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, 1936, I (2), p. 73.
- ANDREASEN (A. M. H.). — *Zur keuntnis des Mählqutes kollodehem Beihefte*, 1928-1927, p. 349.
- CLEMENTS. — Particle shape and surface characteristics of aggregates. *Chemistry and industry*, March 13, 1937, p. 248.
- DURIEZ. — *Matériaux de Construction*. 1950.
- FAURY. — *Le Béton*. Dunod, 1942.
- FÉRET (R.). — La grosseur des grains de matière pulvérulente. *Assoc. Inter. pour l'essai des matériaux*. Zurich, 1931, 11, Group. D.
- FÉRET (R.). — Sur la forme et l'état de surface des éléments inertes des bétons. *Annales de l'Inst. Techn. du Bâtiment et des Travaux Publics*, mars-avril 1937, p. 52.
- FÉRET (R.). — Nouvelles recherches sur la forme des éléments inertes des bétons. *Annales de l'Inst. Techn. du Bâtiment et des Travaux Publics*, mai-juin 1938.
- FUJII (M.). — Effects of forms of particles upon the technical properties of aggregates. *Research Office of Public Works*, Tokio, 1935.
- HEYWOOD (H.). — Numerical definitions of particles size and shape. *Journal of the Society of Chemical Industry*, Vol. LVI; *Chemistry and Industry*, Vol. XV, 1937, Feb. 13, 1937.
- HEYWOOD (H.). — The calculation of the specific surface of a powder. *Inst. Mech. Eng. Proce.*, 1933, 125, pp. 383-459.
- MARKWICK (A. H. D.). — The shape of Crushed stories and gravel and its measurement. *Journal of the Society of Chemical Industry*, Vol. LVI; *Chemistry and Industry*, Vol. XV, 1937, Feb. 27, 1937.
- MARTIN (G.). — Research on the Theory of fine grinding. *Trans. Ceramic Society*, 1923, 4, 23, p. 61.
- OTZEN (R.). — Wertziffern für die Kornform von Splitten und Grösen. *Zement*, 1929, Vol. 18, p. 300.
- ROTHFUGHS (G.). — Bewertung der Verschiedenartigen. — Kornform von Steinschlag und Splitt. *Zement*, 1931, Vol. 20, p. 660.

- VERDEYEN. — *Mécanique des sols et fondations*. Eyrolles, édit.
- WALZ (K.). — Determination of the particle shape of aggregates Betonstrasse 1936, 11 (2), 27-32.

HYDRAULIQUE.

- La bibliographie à consulter est abondante et nous citerons seulement :
- BAGNOLD (R. A.). — The physics of Blown sand on desert Dunes. *London*.
- BLANCHET. — Formation et destruction par un courant d'eau de massifs en pierres. *La Houille Blanche*, n° 2, mars 1946.
- BUDRICK (W.). — Contribution à la théorie du lavage. *Revue de l'Industrie minière*, 1936, pp. 740-750.
- GHALI (M.). — *Matière en suspension dans les eaux des fleuves et sphères dans les liquides*. Paris, Gauthier-Villars, 1935.
- HJULSTROM (F.). — *Bulletin Geol. Inst. of Upsala*, 25 (1936).
- ISBACH. — Les barrages de pierres lancées dans l'eau courante. Extrait des *Annales de l'Institut Hydrotech. de recherches scientifiques en U.R.S.S.*, T. XVII, 1935, p. 12.
- KRUMBEIN. — Fundamental attributes of sedimentary particles. *Proce. of second Hydraulic Conference*, 1942, Université de Iowa.
- Mc NOWN and J. MALAIKA. — Effects of particle shape on settling velocity at low Reynolds numbers. *Transaction of the American Geophysical Union*, Vol. 31, pp. 74-82, 1950.
- ROUSE. — Monogramme pour la détermination de la vitesse de sédimentation des sphères. *Soil Conservation Service*, oct. 1937.
- WADELL. — The coefficient of resistance as a function of Reynolds number for solid of various shapes. *Journal Franklin Institute*, Vol. 217 (1934), pp. 459-490.

DISCUSSION

M. Mc NOWN souligne l'intérêt du travail présenté par M. DURAND et insiste sur les deux éléments de base qui doivent intervenir dans le choix des différents facteurs de forme pour chaque étude particulière : la simplicité à la fois de la définition et des mesures, et la variation nette et systématique des caractéristiques avec les phénomènes étudiés; par exemple, un chercheur qui est intéressé par la vitesse de chute ne peut employer le même facteur pour des particules suivant des lois de chute très différentes.

En particulier, une particule en forme d'aiguille présentera sa résistance minima à l'avancement dans la direction de son grand axe; dans toute autre direction la résistance sera plus grande et pourtant la forme reste identique. MM. MALAIKA et Mc NOWN ont été amenés de ce fait à la notion d'orientation et ont trouvé que la forme elle-même pouvait se caractériser par des modules analogues à ceux employés par M. DURAND. Ils ont en outre constaté que pour des nombres de Reynolds inférieurs à 0,1 toutes les positions étaient stables pour le mouvement en chute libre; ensuite jusqu'à 300, la seule position stable est celle correspondant au maître couple maximum; au-dessus de 300 l'instabilité est systématique et il n'est plus possible de définir une position

moyenne sinon statistiquement. Les considérations d'orientation perdraient beaucoup de leur importance pour l'étude des bétons, et il est évident que l'on ne peut trouver de facteurs de forme qui puissent satisfaire à la fois géologues, ingénieurs et hydrauliciens.

M. Robert DURAND est d'accord avec Mc NOWN sur l'influence de l'orientation, que l'on peut souvent constater dans les mesures.

M. GABRIEL remercie vivement et rappelle que M. Mc NOWN, Professeur à l'Université d'Iowa est en mission d'études à Grenoble, tandis que M. CRAYA accomplit une mission symétrique à l'Université d'Iowa. M. Mc NOWN est un des hydrauliciens américains les plus éminents, particulièrement dans le domaine qui nous occupe. Le Comité technique est extrêmement heureux d'accueillir ses observations autorisées et qui représentent bien le point de vue des hydrauliciens dans ce domaine.

M. CAILLEUX nous a adressé, après la séance, les observations suivantes :

« Il ne faudrait pas croire que la sphère soit la forme vers laquelle tendent, par usure, tous les objets détritiques. Seuls, tendent vers la sphère, les galets soumis à une longue érosion tourbillonnaire (galets de marmite, perles de caverne, etc.) et les grains de 0,4 à 5 mm. oolithiques, formés d'écaillés concentriques (sables des plages marines au voisinage d'Alexandrie et des plages du Grand Lac salé, U.S.A.). Sur les plages marines à forte houles, les galets tendent, non vers la sphère, mais vers des ellipsoïdes aplatis; l'aplatissement augmente quand on passe des quartz aux calcaires et de là aux

schistes. Dans les fleuves, le galet tend vers une forme limite, d'autant plus usée que le fleuve est plus violent dans ses crues, et qui, ellipsoïdale pour de très rares torrents comme la Saoura, est d'ailleurs ovoïde ou simplement polyédrique émoussée. Sous l'action de la seule usure glaciaire, les objets tendent vers le polyèdre émoussé; dans les éboulis et coulées boueuses, l'émoussé est à peine sensible, et la forme demeure polyédrique, ou du moins conforme à l'allure originelle. J'ai donné, en diverses publications, des valeurs numériques d'émoussé, aplatissement et dissymétrie, relatifs à ces différents cas.

« Pour apprécier l'allure d'un galet, l'assimilation à une sphère, proposée par certains auteurs, n'a aucune signification réelle pour le géologue, sauf dans le cas des marmites torrentielles, somme toute fort exceptionnel; la comparaison avec l'ellipsoïde à trois axes inégaux semble meilleure; mais la comparaison avec la figure géométrique originelle (souvent proche d'un parallépipède) serait non moins intéressante.

« Détail de présentation : les notations L' et L'' sont l'occasion de fréquentes coquilles typographiques et confusions, et on ne devrait y recourir qu'après avoir épuisé toutes les lettres de l'alphabet.

« M. CAILLEUX et M. TRICART félicitent M. DURAND de son travail, qui non seulement fournit une mise au point critique d'une grande clarté, mais encore apporte en plusieurs domaines des idées nouvelles très intéressantes. »

M. le Président conclut que la variété des coefficients qu'à indiqués M. R. DURAND montre qu'il y a là un vaste champ à défricher, et le remercie pour toute la documentation qu'il a apportée à ce sujet.

