

**A PROPOS
DE LA GÉNÉRALITÉ
DES LOIS GOUVERNANT LES
ONDULATIONS
SUPERFICIELLES D'UN
MILIEU NON COHÉSIF,
DUES A LA HOULE,
A UN ÉCOULEMENT, OU
AU VENT**

PAR B. A. CHULIAK *

D'après les données expérimentales et théoriques antérieures, l'auteur a obtenu l'expression générale des caractéristiques (hauteur h_i et espacement λ_i) des ondulations superficielles d'un milieu pulvérulent provoquées par la houle, un écoulement ou le vent, qui s'écrit :

$$h_i \sim \lambda_i = \alpha_i \left(\frac{\rho' g d^3}{\rho \nu^2} \right)^{\pm n} (u_i + u'_{ci}) t_i \quad (1)$$

où le signe + est à prendre pour les structures dues à la houle, à l'écoulement et les macroformes causées par le vent, le signe — pour les microformes dues au vent.

Dans cette expression, u est la vitesse du fluide, u'_c la vitesse de début de mouvement des particules solides, g l'accélération de la pesanteur, ρ' et ρ les masses volumiques des particules et du liquide, d la taille des particules, ν la viscosité du fluide, i l'indice du type d'oscillation du fond.

La validité de l'expression (1) pour toutes les espèces d'ondulations superficielles d'un milieu pulvérulent est liée à la difficulté d'interprétation de la grandeur caractéristique t_i qui a la dimension d'un temps. Alors que pour un écoulement périodique il s'agit de la période de la houle, cette analogie temporelle fait défaut pour un écoulement uniforme (liquide ou gazeux). On a surmonté cette difficulté en considérant t_i comme une caractéristique d'interaction et non comme un paramètre des écoulements uniformes. Mais cette interprétation n'a pas totalement éliminé les difficultés, car restent encore inconnues les expressions de t_i pour les différents types d'écoulements uniformes.

Dans le présent article nous fournissons des expressions de t_i pour différentes structures périodiques des écoulements.

L'analyse dimensionnelle appliquée à la grandeur caractéristique t_i propose une des expressions sui-

vantes (H étant la profondeur de l'écoulement) :

$$t_i \sim H/u \quad (2) \quad t_i \sim u/g \quad (2') \quad t_i \sim \sqrt{H/g} \quad (2'')$$

Pour les écoulements en canal (2) et (2') sont peu vraisemblables, car ces relations contiennent une grandeur caractéristique dont la dimension est une vitesse, ce qui exige, soit encore l'intervention d'une vitesse critique u^* , soit la prise en considération supplémentaire de l'influence de la vitesse du courant dont l'expression (1) tient déjà compte. Or, dans celle-ci, la prise en compte de la vitesse a été obtenue à partir de données expérimentales [1], ce qui exclut une fonction supplémentaire de la vitesse de l'écoulement. Il en résulte donc que (2'') est la seule expression possible de t_i pour les structures périodiques dues à un écoulement non périodique.

Nous aboutirions à la même forme de relation par un autre moyen, en passant à la limite à partir d'un écoulement ondulatoire. Écrivons l'expression de la période T des ondes à partir de laquelle s'exprime le paramètre t_i pour des structures périodiques d'origine ondulatoire :

$$T = L/C \quad (3)$$

où C est la célérité des ondes et L la longueur d'onde.

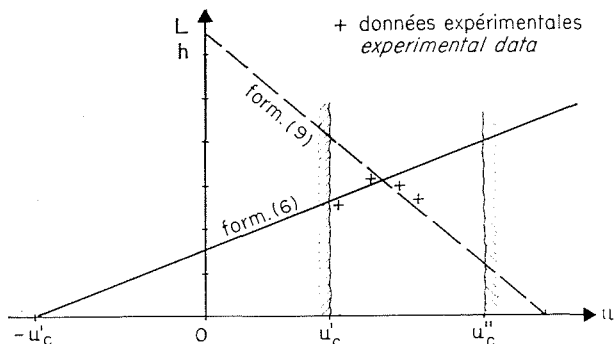
La longueur des ondes de gravité n'étant pas seulement une caractéristique de périodicité spatiale, mais aussi une caractéristique de la profondeur de pénétration du processus ondulatoire dans l'épaisseur du liquide, on peut remplacer la longueur d'onde par la profondeur efficace :

$$L \rightarrow 2\pi H \quad (4)$$

ce qui permet la transformation évidente de l'expression (3) :

$$t_i = T = \frac{L}{C} = \frac{L}{\sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi H}{L}}} \rightarrow \frac{2\pi H}{\sqrt{gH}} = 2\pi \sqrt{\frac{H}{g}} \quad (5)$$

* Moscou.



Comparaison des données expérimentales et des formules (6) et (9). — Les deux traits verticaux $u = u'_c$ et $u = u''_c$ délimitent le domaine d'existence des structures créées par l'écoulement.

Comparison of experimental data with formulae (6) and (9). — The vertical lines for $u = u'_c$ and $u = u''_c$ are the existence boundaries for structures created by the flow.

L'expression (5) coïncide avec (2''), précisément celle que nous avons jugée la seule possible. Nous obtenons ainsi pour les structures périodiques créées par les écoulements (rides) et les formes éoliennes (dunes, chaînes désertiques, bancs, bancs éoliens) :

$$h_2 \sim \lambda_2 = 2 \pi \alpha_2 \left(\frac{\rho' g d^3}{\rho v^2} \right)^{+n} (u_2 + u'_{c2}) \sqrt{\frac{H}{g}} \quad (6)$$

L'expression (6) montre la croissance des paramètres des ondulations avec la profondeur de l'écoulement liquide ou gazeux. En prenant les kilomètres comme ordre de grandeur de H dans le cas du vent, et les dizaines de mètres pour les écoulements et tenant compte de ce que les vitesses doivent être de l'ordre des vitesses de mise en mouvement des particules, soit de l'ordre de 10 et 0,5 m/s respectivement pour le vent et l'eau, nous aboutissons à la valeur suivante pour le rapport entre les paramètres des ondulations de vent et d'eau :

$$\frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{(u_3 + u'_{c3})}{(u_2 + u'_{c2})} \frac{\sqrt{H_3}}{\sqrt{H_2}} \approx 8 \cdot 10^2 \quad (7)$$

en très bon accord avec les observations en nature.

Pour les microformes dues au vent, le paramètre H perd toute signification physique. Ne subsiste donc, parmi (2) à (2''), que la seule expression possible (2') contenant la vitesse caractéristique u^* . Par des considérations physiques générales, on peut rattacher cette vitesse aux paramètres régissant la saltation des particules à la surface du milieu pulvérulent. Compte tenu des signes de (1) nous trouvons :

$$\lambda_4 \sim \alpha_4 \left(\frac{\rho v^2}{\rho' g d^3} \right)^n (u_4 - u'_{c4}) \frac{u^*}{g} \quad (8)$$

On ne peut vérifier rigoureusement à l'heure actuelle, pour des raisons purement techniques, la validité des expressions obtenues pour les structures formées par les écoulements permanents, que pour les ondulations d'écoulement et les microformes éoliennes.

La comparaison de (4) avec les données expérimentales de laboratoire relatives aux structures dues aux écoulements permet d'admettre encore une concordance purement qualitative, mais non quantitative. Pour les structures dues aux écoule-

ments, on observe une correspondance non univoque entre les paramètres h_i et λ_i et ceux de l'écoulement, H et u.

L'analyse soignée des causes de cette discordance a fait découvrir à l'auteur un facteur minimisant la relation rigoureuse (6).

Dans les essais en laboratoire permettant de vérifier (6), le rapport h_2/H change au fur et à mesure que croissent les caractéristiques des structures en cours de développement. Cette variation de h_2/H détruit la similitude cinématique de l'écoulement dont la section est rétrécie. Ce rapport augmentant, c'est-à-dire lorsque $h_2/H \rightarrow 1$, l'interaction entre le milieu pulvérulent et l'écoulement se complique et la relation (6) cesse d'être valable. Une prise en considération élémentaire de cette influence conduit à la relation :

$$h_2 \sim \sigma_2 H \left(1 - \frac{u}{u''_c} \right) \quad (9)$$

où la vitesse de l'écoulement u est définie à partir du débit constant Q établi dans l'installation avant le début de formation des ondulations :

$$u = \frac{Q}{SH} = \frac{q_0}{H}$$

et où u''_c est la vitesse critique d'effacement des ondulations. Tant que $h_2/H \ll 1$, on peut considérer comme naturelles les modalités du développement des ondulations auxquelles doit s'appliquer la relation (6), ce que l'on appellera le « régime propre ». Au contraire si $h_2/H \sim 1$, circonstance que l'on peut nommer « régime impropre », la relation (9) doit être prédominante (fig. 1). Les vérifications expérimentales en laboratoire ont conduit à une concordance satisfaisante avec les relations exposées en utilisant des particules de polystyrène ($\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$), de la poudre de bakélite ($\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$) et du sable siliceux ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$).

Au début, pendant la croissance des caractéristiques des ondulations, la relation $h_2 = h_2(u, H)$ obéit à l'expression (6) qui traduit une augmentation des paramètres des ondulations avec la vitesse d'écoulement. Puis, lorsque h_1/H approche de l'unité, cette relation se mue progressivement en l'expression (9), qui conduit à une réduction des caractéristiques des ondulations du fait de l'accélération de l'écoulement. Cette transformation est responsable de la relation non univoque entre les paramètres des ondulations et les paramètres de l'écoulement même. En « régime propre », l'expression (6) est valable et il en est de même de la relation générale (1) provenant de la généralisation d'ondulations à la surface d'un milieu pulvérulent.

Bibliographie

- [1] CHULIAK (B. A.). — The physics of waves on the surface of cohesionless medium. XIIIth General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics. V-VI. International Association of Physical Oceanography, E 32 Berkeley, California (U.S.A.) (August 1963).
- [2] CHULIAK (B. A.). — Quelques problèmes touchant à l'interaction d'un écoulement alternatif et d'un fond déformable. *Travaux de l'Institut d'Océanologie de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*, vol. 48 (1961).
- [3] CHULIAK (B. A.). — Sur les caractéristiques des structures du fond déformable sous un écoulement alternatif *Doklady Akademii Nauk S.S.S.R. (C.R. de l'Acad. des Sciences de l'U.R.S.S.)*, vol. 131, n° 2 (1960).