Similitude des ondulations de sable des modèles réduits et des dunes du désert

Similitude between sand waves on small-scale
models and dunes in the desert

PAR L. ESCANDE

INGÉNIEUR I.E.T.
PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DIRECTEUR DE L'E.N.S.E.H. DE TOULOUSE

English synopsis p. 193

Dans la technique des études sur modèles réduits des ouvrages hydrauliques à fond affouil-

lable, on est souvent obligé d'éliminer l'emploi de sable fin : l'utilisation de ce matériau con-

FIG. 1.

FIG. 2.

duit, en effet, à un phénomène bien connu des expérimentateurs, et consistant dans la formation, dans le lit du modèle, d'une série d'ondes de sable au tracé plus ou moins tourmenté, désignées parfois sous le nom de « *Riffelbildung* » ; ce phénomène perturbe l'écoulement et fausse l'extrapolation à l'ouvrage réel des résultats obtenus sur le modèle.

En survolant certaines régions de l'Afrique, nous avons été frappés de la similitude d'aspect vraiment curieuse existant entre les rides ainsi produites sur le fond sablonneux des modèles réduits, d'une part, et certaines configurations

des dunes de sable engendrées par le vent dans le désert, d'autre part.

Ce souvenir s'est imposé à notre esprit, tout dernièrement, lorsque nous avons eu l'occasion de lire le remarquable ouvrage, *Géographie aérienne*, de M. Emmanuel DE MARTONNE, et d'observer les beaux clichés du livre *Découverte aérienne du Monde*, préfacé par lui, et publié, sous la direction de M. CHOMBART DE LAUWE, par les éditions « Horizons de France ».

En particulier, la photographie de la figure n° 1, prise par M. GRIAULE, et tirée de ce dernier ouvrage, a retenu notre attention par l'étonnante ressemblance entre le paysage de dunes qu'elle représente et les ondes de sable des modèles réduits d'ouvrages hydrauliques.

Pour préciser cette impression, nous avons réalisé une expérience particulièrement simple, dans un canal à section droite rectangulaire, de 2 m de largeur, dont le fond était constitué par du sable de Garonne, passé à travers un tamis percé de trous circulaires de diamètre égal à 2,5 mm. Nous avons fait circuler dans ce canal, pendant 1 heure 35 minutes, un débit de 121 l/sec., avec un tirant d'eau moyen de l'ordre de 15 cm ; nous avons ensuite arrêté l'écoulement, asséché le modèle et observé les ondulations de sable, engendrées par ce courant : celles-ci, dont les photographies des figures 2 et 3 reproduisent certains aspects, ressemblent à s'y méprendre à celles des dunes du désert visibles sur la figure n° 1.

FIG. 3.

FIG. 4.

La figure n° 4 donne, de façon plus précise, les dimensions du canal étudié et la position des profils verticaux parallèles à la direction générale de l'écoulement, selon lesquels le relevé du relief du fond sablonneux a été effectué : de creux à sommet, la distance verticale oscille en général entre 20 et 40 mm, comme on le voit sur le tableau n° 1.

Nous avons également obtenu, sous l'action d'un courant d'air parcourant un couloir étroit, à section droite rectangulaire et à fond de sable, les ondulations, d'ailleurs moins caractéristiques, visibles sur les photographies des figures n°s 5 et 6 (sable fin de Bayonne), et 7 et 8 (sable de Garonne). Ces photographies sont prises après enlèvement de la glace constituant le plafond du tunnel.

Similitude aérodynamique.

Le phénomène dont nous venons de parler correspond à une similitude aérodynamique particulièrement curieuse. Son interprétation demande de considérer séparément les phénomènes à deux échelles, essentiellement différentes :

1° Le mouvement d'ensemble du fluide, air ou eau, au contact de la paroi à rugosité très accentuée que constitue la surface du désert ou le fond du modèle, correspond à une échelle λ . Les

vitesses et les dimensions mettent en jeu des nombres de Reynolds assez grands pour que ce

FIG. 5.

Fig. 6.

mouvement d'ensemble ne dépende guère de la viscosité, mais, essentiellement, de la pesanteur, agissant sur les matériaux transportés; on doit donc avoir, entre vitesses homologues V , la relation :

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\lambda'} \quad (1)$$

l'indice 2 correspondant au mouvement de l'air dans le désert, l'indice 1 à celui de l'eau dans le modèle réduit.

2° A l'échelle λ des dimensions linéaires moyennes D des grains transportés dans les deux mouvements comparés, la pesanteur et la visco-

Fig. 7.

sité interviennent simultanément et l'on doit avoir :

$$\frac{V_2 D_2}{\nu_2} = \frac{V_1 D_1}{\nu_1} \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\lambda} \frac{\nu_2}{\nu_1} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_2 D_2^2 V_2^2}{\rho_1 D_1^2 V_1^2} = \frac{d_2 D_2^3}{d_1 D_1^3} \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\lambda \frac{d_2}{d_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (3)$$

en désignant par ν le coefficient cinématique de viscosité du fluide, par ρ sa densité et par d la densité dans le fluide correspondant du matériau transporté (poids dans l'air ou dans l'eau).

On tire des conditions (1), (2), (3) les relations suivantes :

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{d_1}{d_2} \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^2}, \quad \frac{V_2}{V_1} = \sqrt[3]{\frac{d_2}{d_1} \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\nu_2}{\nu_1}},$$

$$\lambda' = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 = \left[\frac{d_2}{d_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \right]^{\frac{2}{3}}.$$

Ainsi, dans le cas de l'expérience sur modèle citée précédemment, si l'on admet que :

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{2,4}{1,4} = 1,715 \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{800}$$

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = 15$$

on a :

$$\lambda = 0,547 \quad \frac{V_2}{V_1} = 27,4 \quad \lambda' = 751$$

TABLEAU N° 1

NOTA. — Les deux chiffres donnés pour chaque point indiquent, le premier, la distance à Δ_1 , le deuxième, l'altitude en centimètres, positive ou négative, par rapport au plan horizontal constituant la surface du fond initial.

NUMÉROS DES PROFILS

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DISTANCES A LA RIVE DROITE								
20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,45	-0,45	-0,10	-0,25	-1,10	-0,25	-0,05	-1,10	+2,25
30	30	25	34	12	19	30	10	19
-0,70	-0,25	+0,10	+0,85	-0,65	-0,10	-1,15	-4,65	+2,05
60	60	27	36	14	20	37	73	22
+0,05	+0,05	-0,75	-0,45	-1,15	-0,65	-2,15	+0,95	+0,05
81	84	41	43	28	29	42	80	43
-0,15	+0,25	-0,20	-0,35	-0,25	-0,25	-0,25	-1,20	+1,25
83	86	43	45	30	30	45	100	69
-0,55	-0,15	-0,95	-0,95	-1,35	-0,85	-1,35	+0,25	+1,45
88	88	50	60	50	46	48	105	110
-0,25	+0,05	-0,65	+1,25	+0,45	-0,45	-1,50	-0,55	-0,15
98	93	52	67	52	47	55	110	115
+0,05	+0,15	-1,60	-0,75	-0,45	-1,15	-0,25	-0,45	-0,75
99	95	59	77	72	59	57	125	150
-0,45	-0,40	0,00	-0,85	+0,85	-0,05	-1,00	+0,75	-0,45
104	104	61	80	76	60	66	134	190
-0,15	-0,30	-1,25	-2,25	-0,65	-0,65	+0,25	+0,25	-0,05
110	105	76	84	86	67	67	153	
+0,40	-0,75	+0,15	-1,45	-0,05	-0,15	-0,55	-0,75	
116	109	79	95	90	70	83	154	
+0,15	-1,10	-1,25	+0,75	-1,45	-1,00	+0,45	-1,70	
118	111	85	96	100	79	85	164	
-0,40	-1,90	+0,35	-0,10	+1,25	-0,25	-0,35	-1,50	
130	114	91	115	101	81	93	165	
-0,60	-0,55	+0,75	+0,35	+0,35	-1,75	+0,80	-2,60	
142	131	92	119	117	90	95	174	
-0,05	+0,05	0,00	-1,50	+0,25	-1,85	-0,55	-1,10	
143	133	110	130	120	93	106	185	
-0,95	-1,10	+1,25	-0,75	-2,25	-2,40	-0,25	+0,55	

NUMÉROS DES PROFILS

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DISTANCES A LA RIVE DROITE								
20	40	60	80	100	120	140	160	180
154	148	113	144	134	95	120	190	
-0,90	-0,10	-0,75	+1,00	-0,05	-1,75	+0,15	0,00	
160	150	128	146	137	96	122		
-0,65	-0,55	-0,15	-0,25	-0,65	-2,15	-1,05		
165	162	132	163	143	102	140		
-0,75	+0,35	-2,40	+1,05	-0,95	-1,20	-0,90		
170	164	139	175	154	103	144		
-0,20	-0,55	-0,25	+0,55	+0,30	-1,45	-2,45		
175	173	142	180	155	115	148		
-2,35	-0,85	-1,50	-0,15	-0,45	-0,05	-2,10		
180	175	157	186	165	120	158		
-1,15	-1,90	+0,85	-0,60	-0,25	-2,40	+0,75		
185	182	159	190	167	123	161		
-0,35	-0,75	-0,25	0,00	-1,40	-2,85	+0,05		
190	187	180		183	128	164		
0,00	-0,40	-0,45		-0,05	-1,95	0,00		
	190	184		184	148	170		
	0,00	-2,75		-0,75	+1,05	-0,55		
		190		190	149	190		
		-0,65		+0,05	+0,20	+0,95		
					170			
					+0,65			
					172			
					-0,15			
					184			
					+0,25			
					190			
					0,00			

Compte tenu des données du modèle hydraulique (sable passant à l'anneau de 2,5 mm, ondulations de 2 à 4 cm, vitesse moyenne du courant 40 cm/sec.), les dunes semblables, d'un relief de 15 à 30 mètres, seraient obtenues pour un vent de 40 km à l'heure, avec du sable passant à l'anneau de 1,4 mm.

Notons que, lors de l'expérience sur le modèle réduit hydraulique, on pouvait faire apparaître

les ondulations, d'ailleurs plus petites, pour des vitesses notablement plus faibles que 40 cm/sec.

Pour opérer de façon plus précise, il conviendrait de partir des données caractérisant une zone de dunes désertiques assez bien définies (V_2, D_2, d_2), d'en déduire, par les relations ci-dessus, les données à faire intervenir dans le modèle hydraulique, et d'observer les caractéristiques des ondulations obtenues, dans ces conditions, sur son fond affouillable.

FIG. 8.