Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques *

The perviousness of rock fill breakwaters to periodic gravity waves *

(SUITE ET FIN)

(Cf. la Houille Blanche, n° 6, 1957)

PAR B. LE MÉHAUTÉ

INGÉNIEUR E.N.S.E.H.T. — INGÉNIEUR A LA SOGREAH

(Actuellement Professeur Adjoint à l'Ecole Polytechnique de Montréal)

AVANT-PROPOS et NOTATIONS.

PREMIÈRE PARTIE. — ETUDE DES LOIS DE L'ÉCOULEMENT PÉRIODIQUE DANS UN MASSIF PERMÉABLE.

Chap. I. *Equations du mouvement.*

Chap. II. *Intégration de l'équation générale du mouvement.*

Chap. III. *Perméabilité d'un massif long soumis à une onde incidente.*

Chap. IV. *Massif de largeur faible par rapport à la longueur d'onde.*

DEUXIÈME PARTIE. — ETUDE DES LOIS DE SIMILITUDE DE LA PERMÉABILITÉ D'UN MASSIF EN ENROCHEMENTS.

Chap. I. *Position du problème. Difficultés d'une semblable étude.*

Chap. II. *Etablissement des règles de similitude de l'écoulement à travers un massif perméable.*

Chap. III. *Similitude des écoulements dans un massif en enrochements en régime permanent.*

Chap. IV. *Possibilité d'application des règles de similitude.*

Chap. V. *Applications pratiques aux digues en enrochements.*

Remarques.

TROISIÈME PARTIE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES.

Chap. I. *Appareillage expérimental : 1) Canaux à houle. 2) Appareillage de mesure. 3) Les mesures des caractéristiques du massif.*

Chap. II. *Résultats expérimentaux obtenus avec des massifs de largeur constante.*

Chap. III. *Description physique des phénomènes et examen des résultats expérimentaux.*

Chap. IV. *Vérification des lois de similitude.*

Chap. V. *Calculs de profils de digues en enrochements et résultats d'essais.*

Chap. VI. *Précision des résultats : 1) Erreur sur la connaissance des lois de l'écoulement. 2) Erreurs expérimentales. 3) Erreurs sur la connaissance des conditions naturelles.*

CONCLUSION.

PREFACE and HEADINGS.

PART 1. STUDY OF THE PERIODIC FLOW LAWS IN A PERMEABLE STRUCTURE.

Chapter I. *Equations of movement.*

Chapter II. *Integration of the general equation of movement.*

Chapter III. *Permeability of an extended structure subjected to an incident wave.*

Chapter IV. *Small width structure in relation to wave length.*

PART 2. STUDY OF THE SIMILITUDE LAWS FOR PERMEABILITY IN A ROCK FILLED STRUCTURE.

Chapter I. *Posing the problem. Difficulties of a similarity study.*

Chapter II. *Establishing the rules for flow similarity through a permeable structure.*

Chapter III. *Flow similitude in a rock filled structure in permanent regime.*

Chapter IV. *Possible application of similitude laws.*

Chapter V. *Practical application to rock fill dykes.*

COMMENTS.

PART 3. EXPERIMENTAL RESEARCH.

Chapter I. *Experimental equipment : a) Wave flumes. b) Instrument equipment. c) Measuring the characteristics of the structure.*

Chapter II. *Results obtained from tests on constant width structures.*

Chapter III. *Physical description of the phenomena and analysis of test results.*

Chapter IV. *Verification of the similitude laws.*

Chapter V. *Calculation of rock fill dyke profiles and test results.*

Chapter VI. *Accuracy of results : a) Error associated with the flow laws. b) Experimental errors. c) Error from uncertain knowledge of the true life conditions.*

CONCLUSION.

* Thèse présentée devant la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble pour l'obtention du titre d'Ingénieur-Docteur.

TROISIÈME PARTIE

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE V

CALCULS DE PROFILS DE DIGUES EN ENROCHEMENTS ET RÉSULTATS D'ESSAIS

Le principe du calcul du profil répondant aux lois de similitude de perméabilité a été exposé dans la deuxième partie de notre ouvrage. Avant de passer à son application, nous préciserons certains points.

1. L'INDICE DE VIDE.

Faute de renseignements sur la valeur exacte des indices de vide des matériaux destinés à construire la jetée, nous avons pris les valeurs suivantes pour les cas particuliers traités ici.

PROFIL en enrochements	PROFIL avec blocs à contre-pente
TV < 500 kg 30 %	TV < 200 kg 32 %
500 kg à 2 t 35 %	200 kg à 2 t 32 %
2 t à 10 t 35 %	2 t à 5 t 35 %
10 t à 20 t 40 %	5 t à 15 t 38 %

2. DIAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES
DES ENROCHEMENTS.

Nous avons vu que les diamètres caractéristiques auxquels les calculs doivent se référer correspondent aux granulométries les plus petites pour chaque zone considérée. Nous baserons donc nos calculs sur les poids des matériaux les plus fins, en assimilant ceux-ci à des sphères de même poids.

Si nous supposons que la densité des enrochements est de 2,8, le diamètre sera donné par la formule :

$$d = \sqrt[3]{\frac{6P}{2,8\pi}}$$

Pour le tout-venant des jetées entièrement construites en enrochements, nous avons pris un poids minimum de 10 kg correspondant sensiblement à un diamètre de 20 cm, pour les jetées en enrochements. Pour les jetées avec blocs à contre-pente, nous avons pris un poids minimum de 5 kg correspondant à un diamètre de 16 cm.

Le calcul du profil sera donc fait pour chaque zone granulométrique en se référant au diamètre des enrochements de poids minimum. Les coefficients de grossissement K ainsi calculés serviront à déterminer les granulométries de toute la couche considérée. Les enrochements les plus gros auront donc le même grossissement que les enrochements les plus petits de la même couche. Par conséquent, mélangés dans une proportion identique à celle de la nature, ils doivent théoriquement assurer le même indice de vide. On conçoit que cette considération théorique nécessite, en premier lieu, un travail de triage d'enrochements long et délicat puisque l'on cherche à obtenir un indice de vide bien déterminé. Ce travail doit être fait par approximations successives, guidé par exemple par les diagrammes ternaires de Ferret. Mais la mesure de l'indice de vide étant particulièrement influencée par le tassement et par les effets des parois, nous n'avons pu obtenir une précision supérieure à 2 %.

PROFILS CALCULÉS ET ESSAIS EFFECTUÉS

Profil	Similitude respectée pour $2\alpha=$	Niveau ΔH m	Périodes essayées en s
Profil en enrochements avec masque étanche..... (1)	1 m	0,00	10, 20, 30, 35
Profil en enrochements sans masque étanche..... (2)	1 m	0,00	10, 20, 30, 35
		2,00	35
Profil avec blocs à contre-pente non jointifs..... (3)	1 m	0,00	10, 20, 30, 35
Profil avec blocs à contre-pente jointifs..... (3)	1 m	0,00	35
Profil en enrochements avec masque étanche..... (4)	10 m	0,00	10, 20, 30, 35
		2,00	35

Nous avons vu comment on détermine la valeur l des ouvrages par la formule :

$$l = l_i = \Sigma l_j (d_i/d_j)^n$$

Nous considérerons que dans la nature l'écoulement est toujours turbulent et nous prendrons par suite $n=1$.

Le premier travail consiste à tracer sur le plan des ouvrages projetés les lignes de courant les plus probables. Nous verrons qu'une erreur sensible sur ce tracé se traduit par une erreur très faible sur les coefficients de grossissement. Il est donc tout à fait inutile de chercher une grande précision dans le tracé de ces lignes.

Le calcul de la longueur l étant fait pour chaque courbe granulométrique, on détermine le groupement de variables $H_e d^3 \varepsilon^5 / l$ qui, à l'aide de l'abaque n° 6, nous donne le coefficient de grossissement K en fonction de l'échelle. Nous avons pris une charge efficace respectivement égale à 1 m et à 10 m.

Lorsque la charge efficace est de 1 m, on peut considérer que les résultats trouvés sur le modèle sont en similitude pour la transmission des houles de beau temps ou pour la transmission d'ondes longues auxquelles se superposent ces houles.

Lorsque la charge efficace est de 10 m, on peut considérer que les résultats obtenus correspondent pratiquement à la transmission des houles de tempête ou à la transmission d'ondes longues pendant une tempête.

Un premier tableau ci-dessus donne les conditions d'essais : sur les tableaux suivants, nous avons détaillé les différents calculs nous donnant les granulométries minimum et maximum du modèle.

Dans une première colonne, nous donnons la catégorie des enrochements constituant les digues, puis le poids minimum et maximum de ces catégories et les granulométries correspondantes.

Dans une quatrième colonne, nous trouvons l'indice de vide correspondant à chacune de ces catégories : la largeur l est calculée suivant la méthode que nous avons indiquée ci-dessus. Nous donnons : tout d'abord la largeur mesurée sur les figures des digues essayées pour chacune des couches étudiées. Puis la largeur calculée en additionnant cette largeur ainsi mesurée aux largeurs des couches voisines, multipliées par le rapport des granulométries. Enfin, la largeur adoptée pour nos calculs, en faisant une moyenne lorsque les résultats obtenus dans le calcul des largeurs ne justifient pas l'adoption de plusieurs coefficients de grossissement.

Les deux colonnes suivantes donnent la valeur du produit $H_e d^3 \varepsilon^5 / l$ et le coefficient K correspondant; en multipliant ces coefficients par les granulométries minimum et maximum données dans la troisième colonne, nous obtenons les granulométries minimum et maximum du modèle pour chacune des couches granulométriques.

Les figures 18, 19 et 20 ci-après donnent

Fig. 18. — Parcours moyen des trajectoires fluides à travers une digue en enrochements avec noyau étanche.

Fig. 19. — Parcours moyen des trajectoires fluides à travers une digue en enrochements sans noyau étanche.

Fig. 20. — Parcours moyen des trajectoires fluides à travers une digue en blocs à contre-pente

approximativement les parcours moyens des trajectoires fluides à travers les digues.

Les quatre tableaux qui suivent donnent le détail des calculs, dont les résultats sont présentés par les figures 21 - 21 a - 22 - 22 a - 23 - 23 a - 24.

Tous ces essais ont été effectués à l'échelle

du 1/100^e dans un canal à houle de 60 cm de largeur et de 30 m de long. Le générateur d'ondes peut réaliser des périodes allant de 5 à 35 secondes nature. Les mesures des amplitudes, les clapotis partiels incidents ont été effectués à l'E.G.H. et les amplitudes transmises derrière le massif, qui sont en général très faibles, ont été

PROFIL N° 1

 EN ENROCHEMENTS AVEC MASQUE ÉTANCHE. -- SIMILITUDE RESPECTÉE POUR $C=2 a=1$ m

Echelle 1/100

Catégorie	Poids kg densité 2,8		Granulométrie δ cm		Indice de vide ε %	Largeur x cm			$C\delta^3\varepsilon^2/x$	K	δ_M cm	
	Min.	Max.	Min.	Max.		Mesurée	Calculée	Adoptée			Min.	Max.
< 500 kg	10	500	20	74	30	$x_1=8.750$ $x_2=6.100$		7.000	0,30	8,2	1,7	6,3
						$x_3=2.800$ $x_4=500$						
< 500 kg à 2 t	500	2.000	74	117	35	$x_1=1.500$ $x_2=1.500$	$1.500 + 7.000 \times (74/20)$	27.400	7,36	4,6	3,4	5,3
						$x_3=1.800$ $x_4=1.300$	$1.300 + 1.200 \times (74/20)$	5.740	36,2	3,5	2,55	4,1
10 t à 2 t	2.000	10.000	117	200	3,5	$x_1=1.000$ $x_2=700$	$850 + 7.000 \times (117/20)$	41.750	20,2	3,9	4,56	8
						$x_3=900$ $x_4=2.500$	$1.700 + 1.200 \times (117/20)$	8.700	96	3	3,5	6
10 t à 20 t	10.000	20.000	200	252	40	$x_1=0$ $x_2=600$	$300 + 7.000 \times (200/20)$	70.300	114	2,8	5,6	7,3
						$x_3=600$ $x_4=400$	$500 + 1.200 \times (200/20)$	12.500	640	2,2	4,4	5,5

 FIG. 21. — Plan du modèle réduit au 1/100 d'une digue en enrochements avec noyau étanche, la similitude étant respectée pour $2 a=1$ m.

FIG. 21 a. — Photographie correspondant à la figure 21.

FIG. 22. — Plan du modèle réduit au 1/100 d'une digue en enrochements sans masque étanche, la similitude étant respectée pour $2a=1$ m.

FIG. 22 a. — Photographie correspondant à la figure 22.

FIG. 23. — Plan du modèle réduit au 1/100 d'une digue avec blocs à contre-pente, la similitude étant respectée pour $2a=1$ m.

PROFIL N° 2

PROFIL EN ENROCHEMENTS SANS MASQUE ÉTANCHE. — SIMILITUDE CALCULÉE POUR $C=2$ $a=1$ m

Echelle 1/100

Catégorie	Poids kg densité 2,8		Granulométrie δ_M cm		Indice de vide ε %	Largeur x cm			$C\delta^3\varepsilon^2/x$	K	δ_M cm	
	Min.	Max.	Min.	Max.		Mesurée	Calculée	Adoptée			Min.	Max.
< 500 kg	10	500	20	74	30	$x_1=8.750$ $x_2=6.100$		7.000	0,30	8,2	1,64	6,06
						$x_3=2.800$		2.800	0,70	7	1,40	5,18
500 kg à 2 t	500	2.000	74	117	35	$x_1=1.500$ $x_2=1.500$	$1.500 + 7.000 \times (74/20)$		7,66	4,7	3,5	5,5
						$x_3=1.800$	$1.800 + 2.800 \times (74/20)$	13.000	16,10	3,2	2,3	3,7
						$x_4=300$		500	400	2,4	1,8	2,7
2 t à 10 t	2.000	10.000	117	200	35	$x_1=1.000$ $x_2=7.000$	$850 + 7.000 \times (117/20)$	41.150	20,20	3,9	4,56	7,8
						$x_3=1.000$ $x_4=4.660$	$3.300 + 2.800 \times (117/20)$	22.800	36,80	3,5	4,10	7
						$x_5=3.000$		3.000	280	2,5	2,90	5
2 t à 10 t	10.000	20.000	200	252	40	$x_1=0$ $x_2=600$	$300 + 7.000 \times (200/20)$	70.300	113	2,8	5,6	7
						$x_3=600$ $x_4=500$	$600 +$	44.660	179	2,7		
						$x_5=500$	$500 + 3.000 \times (200/117)$	5.600	142,8	1,8	3,6	4,5

FIG. 23 a. — Photographie correspondant à la figure 23.

PROFIL N° 3

PROFIL AVEC BLOCS A CONTRE-PENTES. — SIMILITUDE CALCULÉE POUR $C=2$ $a=1$ m

Echelle 1/100

Catégorie	Poids kg densité 2,8		Granulométrie δ cm		Indice de vide ε %	Largeur x cm			$C\delta^3\varepsilon^5/x$	K	δ_M cm	
	Min.	Max.	Min.	Max.		Mesurée	Calculée	Adoptée			Min.	Max.
0 à 200 kg	5	200	16	52	32	$x_1=6.600$ $x_2=4.100$		5.350	0,25	8,3	1,32	4,3
						$x_3=2.340$		2.340	0,57	7,2	1,15	3,74
200 kg à 2 t	200	2.000	52	117	32	$x_1=400$ $x_2=400$	$400 + 5.350 \times (52/16)$	18.000	7,6	5	2,6	5,6
						$x_3=1.140$ $x_4=700$	$1.140 + 2.340 \times (52/16)$ 700	7.500	18,4	3	1,56	3,4
2 t à 5 t	2.000	5.000	117	153	32	$x_1=0$ $x_2=1.060$	$530 + 5.350 \times (117/16)$	38.000	12,1	4,6	5,2	7
						$x_3=1.320$ $x_4=1.860$	$1.540 + 2.430 \times (117/16)$	18.000	25,5	3,8	4,3	5,8
						$x_5=2.460$		2.460	18,7	2,8	3,2	4,7
5 t à 15 t	5.000	15.000	153	220	38	$x_1=0$ $x_2=500$	$500 + 5.350 \times (153/16)$	53.000	50	3,5	3,5	7,7

FIG. 24. — Plan du modèle réduit au 1/100 d'une digue en enrochements avec masque étanche, la similitude étant respectée pour $2a=10$ m.

PROFIL N° 4

PROFIL EN ENROCHEMENTS AVEC MASQUE ÉTANCHE. — SIMILITUDE CALCULÉE POUR $C=2$ $a=10$ m

Echelle 1/10

Catégorie	Poids kg densité 2,8		Granulométrie δ cm		Indice de vide ε %	Largeur x cm			$C\delta^3\varepsilon^5/x$	K	δ_{modele} cm	
	Min.	Max.	Min.	Max.		Mesurée	Calculée	Adoptée			Min.	Max.
500 kg	10	500	20	74	30	$x_1=8.750$ $x_2=6.100$	7.000	7.000	3	5,5	1,10	4
						$x_3=2.800$ $x_4=500$	1.200	1.200	17	4	0,82	3
500 kg à 2 t	500	2.000	74	117	35	$x_1=1.000$ $x_2=1.500$	$7.000 \times (74/20) + 1.500$	28.000	71	3	2,2	3,5
						$x_3=1.800$ $x_4=800$	$1.200 \times (74/20) + 1.300$	6.000	330	2,4	1,8	2,8
2 t à 10 t	2.000	10.000	117	200	38	$x_1=1.000$ $x_2=700$	$7.000 \times (117/20) + 700$	40.000	200	2,2	2,6	4,4
						$x_3=900$ $x_4=2.500$	$1.200 \times (117/20) + 1.700$	8.500	940	2	2,35	4
10 t à 20 t	10.000	20.000	200	252	40	$x_1=0$ $x_2=600$	$7.000 \times (100/20) + 300$	70.000	1.100	1,8	3,6	4,5
						$x_3=600$ $x_4=400$	$1.200 \times (2.000/20) + 500$	20.000	4.000	1,3	2,6	1,95

effectuées à l'aide d'une sonde à pointe vibrante qui supprime l'effet du ménisque capillaire.

Les résultats obtenus sont consignés sur les courbes ci-jointes. Nous donnons :

1. La valeur des coefficients de transmission pour différentes amplitudes et différentes périodes, en soulignant l'amplitude pour laquelle la similitude est théoriquement respectée (fig. 25). Nous avons transformé ces résultats dans le système d'axes coefficients de transmission-périodes, les courbes étant tracées à amplitude constante. Nous voyons facilement que la transmission est pratiquement négligeable pour les houles, mais dès que la période atteint 20 ou 30 s, la transmission doit être prise en compte (fig. 25).

2. La valeur des coefficients de réflexion correspondants est donnée sur la planche 25.

Nous retrouvons sur toutes ces courbes les lois qualitatives déjà énoncées lors de l'étude des massifs de largeur constante :

- a) l'effet de l'inertie se fait d'autant plus sentir que le rapport de la largeur de l'ouvrage sur la longueur d'onde est grand. Le profil avec blocs à contre-pente, moins large que le profil en enrochements, est donc relativement plus perméable aux ondes courtes que ce dernier;
- b) le coefficient de transmission augmente lorsque l'amplitude décroît, par suite de la diminution des pertes par frottement;
- c) la comparaison entre les courbes obtenues sur le même massif nature, mais calculées en

Profil en enrochements avec masque étanche — Similitude respectée pour $2a = 1\text{m}$ Profil en enrochements sans masque étanche — Similitude respectée pour $2a = 1\text{m}$

T_s	
35	○
30	▽
20	△
10	□

0 1 2 3 4 5 m

Profil avec blocs à contre-pente — Similitude respectée pour $2a = 1\text{m}$ Profil en enrochements avec masque étanche — Similitude respectée pour $2a = 10\text{m}$

FIG. 25. — Résultats numériques des digues essayées.

vue d'assurer la similitude pour des valeurs différentes de l'amplitude ($2a=1$ m, $2a=10$ m) montre l'importance de la turbulence induite par les houles accompagnant les ondes longues. La jetée est relativement moins perméable aux ondes longues en période de tempête qu'en période de beau temps. Le coefficient de transmission réel en fonction de l'amplitude peut être obtenu en interpolant les courbes expérimentales correspondant aux deux massifs calculés;

- d) le coefficient de réflexion diminue avec la cambrure de la houle incidente, ce qui confirme les lois maintenant connues de la réflexion;
- e) la comparaison entre le massif en enrochements, avec et sans masque étanche, montre que ce dernier a une influence quasiment négligeable. Ceci est dû au fait que

ce masque étanche, construit dans la partie supérieure de la digue, ne fait pratiquement pas obstruction à la transmission des ondes longues. Les résultats obtenus ne semblent donc pas justifier la construction de ce masque tel que nous l'avons dessiné, c'est-à-dire en tout-venant de carrière;

- f) par contre, la comparaison entre les coefficients de transmission obtenus sur le profil avec blocs à contre-pente jointifs et non-jointifs montre l'importance de ce facteur, puisque l'écart de la transmission est de l'ordre de 30 %. On peut donc agir sur ces variables dans la mesure où la stabilité le permet et où cette modification n'augmente pas sensiblement le prix de la construction. (Pour éviter les sous-pressions sous les blocs de carapace, il est certain qu'il faut laisser entre les blocs une faible distance.)

CHAPITRE VI

PRÉCISION DES RÉSULTATS

Il existe trois sources d'erreurs :

1. Les erreurs sur la connaissance des lois de l'écoulement lorsque toutes les conditions naturelles sont parfaitement connues;
2. Les erreurs des mesures expérimentales;
3. Les erreurs sur la connaissance des conditions naturelles.

Nous ne ferons pas ici un calcul systématique de l'erreur probable. Cependant, nous pensons utile de s'attarder sur ce point, afin d'orienter les recherches futures.

1. ERREUR SUR LA CONNAISSANCE DES LOIS DE L'ÉCOULEMENT.

Il est difficile de connaître l'erreur due à l'extrapolation des lois d'écoulement à travers des enrochements de granulométrie homogène d'un diamètre inférieur à 20 cm, aux lois de l'écoulement à travers des enrochements de granulométrie hétérogène supérieure à 50 cm. Notons toutefois que des essais nouveaux récemment effectués au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique par M. Cohen de Lara (Cf. [24]) ont permis de repousser les limites de notre connaissance jusqu'à des nombres de Reynolds atteignant 10^5 . L'écoulement est alors pleinement turbulent et

il semble logique d'extrapoler ces résultats aux cas qui nous intéressent.

Mais que faut-il entendre par connaissance des lois des écoulements? Nous connaissons les variables qui influent sur les pertes de charge et la forme de la relation qui les lie. Nous pouvons déterminer le coefficient C et la fonction f à l'aide des résultats obtenus, mais, malgré tout le soin apporté aux essais, l'erreur introduite dans ce coefficient est de l'ordre de 50 %. Ceci est principalement dû à la difficulté de préciser le diamètre caractéristique des enrochements et l'erreur sur la mesure de l'indice de vide.

De plus, le coefficient C est modifié par la rugosité des blocs d'une façon qui est encore mal précisée.

De plus, le passage des lois du régime continu aux lois du régime périodique s'accompagne aussi d'une erreur; mais nous avons vu qu'à partir du moment où les couches limites turbulentes, se développant à partir de chaque enrochement, se joignent pour établir dans le massif une turbulence homogène, la notion de charge efficace pouvait être introduite avec succès, bien que la définition de la charge efficace puisse être modifiée quand il y a déferlement sur une paroi oblique. Dans l'état actuel de la technique, il est difficile de préciser dans quelle proportion.

2. ERREURS EXPÉRIMENTALES.

Les erreurs expérimentales sont principalement dues au manque de précision dans la réalisation des profils. Nous avons vu qu'il fallait à la fois réaliser des conditions hydrodynamiques et hydrostatiques, ce qui nécessite de doser par approximation des mélanges binaires ou ternaires. La recherche de la précision nécessiterait des efforts longs et coûteux, d'ailleurs injustifiés, car la principale source d'erreurs restera la connaissance des conditions naturelles.

3. ERREURS DANS LA CONNAISSANCE DES CONDITIONS NATURELLES.

Dans l'état actuel de la technique, les ressources du modèle réduit sont encore bien supérieures aux connaissances des phénomènes naturels. En effet, nous avons vu quelle est l'importance de la détermination de la granulométrie caractéristique et de l'indice de vide sur la valeur du coefficient de transmission. Or, dans la nature, nous connaissons le diamètre caractéristique des enrochements de carrière avec une précision de l'ordre de 100 %. Quant à l'indice de vide, une erreur de 5 % sur celui-ci est fort possible.

Il faudrait, pour réduire cette erreur, connaître les courbes granulométriques des produits de carrière; or, généralement, l'étude des profils est faite avant leur exploitation et l'on sait qu'il est très difficile de prévoir ce que donnera une carrière.

Remarquons que les données basées sur l'analyse des produits de carrière est encore insuffisante, car il faut ajouter l'effet de tassement dans le temps, qui reste une variable inconnue, le développement des algues, l'introduction en période de beau temps de sable à travers le noyau de tout-venant, etc.

Pour effectuer le calcul d'erreurs, il y a lieu de distinguer les erreurs par rapport à la nature et les erreurs relatives entre modèles, qui sont généralement beaucoup plus faibles. Or, les résultats des différents modèles construits à la même échelle, suivant les mêmes principes, permettent des comparaisons qui, à elles seules, justifient en bonne part les essais.

Les erreurs possibles énumérées au début de ce chapitre sont réduites à quelques erreurs fondamentales. En effet, de nombreux phénomènes plus ou moins connus se retrouvent intégralement sur le modèle d'une façon quasi identique à celle de la nature : déferlement, absorption d'énergie à la paroi, etc. L'erreur sur la connaissance exacte des lois de l'écoulement se limite donc à la détermination de l'erreur qui en résulte dans l'établissement des

lois de similitude, c'est-à-dire l'erreur faite sur l'énergie perdue dans le massif.

Les erreurs de mesures expérimentales sont faibles et peuvent être en général négligées. Les erreurs essentielles restent celles sur la connaissance des conditions naturelles.

Pour faire le calcul d'erreur relatif à nos essais sur les modèles de digues, nous devons faire le bilan de l'énergie de l'onde arrivant sur l'ouvrage :

- l'énergie incidente E_i se répartit en énergie absorbée dans le déferlement sur la paroi : E_a ,
 - en énergie réfléchie : E_r ,
 - en énergie absorbée par frottement à l'intérieur de la digue : E_a ,
 - et enfin en énergie transmise : E_t ;
- ce qui se traduit par l'équation :

$$E_i = E_a + E_r + E_a + E_t$$

L'erreur sur l'énergie transmise E_t est donc égale à la somme des erreurs faites sur les autres termes, c'est-à-dire :

$$\Delta E_t = \Delta E_a + \Delta E_r + \Delta E_a + \Delta E_i$$

Or, les erreurs faites sur l'énergie incidente, sur l'énergie absorbée dans le déferlement et sur l'énergie réfléchie (phénomènes qui répondent parfaitement à la similitude de Froude) sont tout à fait négligeables. (On a mesuré que ces phénomènes peuvent présenter un léger effet d'échelle lorsque celle-ci est de l'ordre du $1/150^{\circ}$).

On peut donc écrire que l'erreur faite sur l'énergie transmise est égale à l'erreur faite sur l'énergie absorbée dans le massif :

$$\Delta E_t \approx \Delta E_a$$

L'énergie absorbée dans le massif par unité de temps est de la forme : RU^2 .

Or,

$$RU = \frac{g\Delta H}{\Delta l} \frac{C(Ud/v)}{\varepsilon^5} \frac{U^2}{2d}$$

de telle sorte que l'énergie absorbée prend la forme :

$$E_a \approx \left(\frac{gH_c}{l} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{2d\varepsilon^5}{C(Ud/v)}}$$

et l'erreur maximum faite sur E_a , donc sur E_t , est égale à :

$$\frac{\Delta E_t}{E_a} = \frac{\Delta E_a}{E_a} = \frac{3}{2} \frac{\Delta H_c}{H_c} + \frac{3}{2} \frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{2} \frac{\Delta d}{d} + \frac{5}{2} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C}$$

Appelons N cette expression. L'erreur quadratique moyenne (erreur probable), que nous appellerons M, sera égale à :

$$\frac{\Delta E_t}{E_a} = \frac{\Delta E_a}{E_a} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{\Delta H_e}{H_e} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{5}{2} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} \right)^2}$$

L'erreur relative à l'énergie incidente est donc égale à :

$$\frac{\Delta E_t \text{ ou } \Delta E_t}{E_i} = \frac{E_a}{E_i} \text{ (N ou M)}$$

Il est difficile d'évaluer E_a , mais on connaît l'ordre de grandeur de l'énergie perdue dans le déferlement E_d et l'énergie réfléchie E_r . D'autre part, on peut négliger l'énergie transmise devant E_d ou E_r , de telle sorte que l'erreur $\Delta E_t/E_i$ devient égale à :

$$\frac{\Delta E_t \text{ ou } \Delta E_t}{E_i} = \left[1 - \frac{E_d + E_r}{E_i} \right] \text{ (N ou M)}$$

L'erreur relative faite sur le coefficient de transmission t est évidemment plus forte puisqu'elle ne dépend plus directement de l'énergie absorbée dans le déferlement et de l'énergie réfléchie. En effet, on a :

$$\frac{\Delta E_t \text{ ou } \Delta E_t}{E_t} = \frac{E_a}{E_t} \text{ (N ou M)}$$

d'où :

$$\frac{\Delta t \text{ ou } \Delta t}{t} = \frac{1}{2} \frac{E_a}{E_t} \text{ (N ou M)}$$

Nous appliquerons ces formules en tenant compte des remarques faites ci-dessus et nous distinguerons les deux cas : erreurs faites entre modèle et nature et erreurs faites entre modèles.

Dans le premier cas, nous avons vu que l'erreur faite sur $C(Ud/v)$ peut être de 50 % (cette erreur englobant l'erreur due au nombre de Reynolds), celle sur d de 100 % et celle sur ε de 5 %.

On peut évaluer l'erreur faite sur H_e à 33 % et celle faite sur le calcul de l à 33 %. Notons bien que ces erreurs ne sont commises que dans la détermination du coefficient de frottement, donc du grossissement K du matériau. Il est évident que l'erreur faite sur la largeur l dans la réalisation du modèle est tout à fait négligeable, de même que l'erreur faite pendant l'essai sur la charge efficace H_e puisque l'on reproduit presque parfaitement la houle incidente et les phénomènes sur le parement de la digue.

Remarquons en toute rigueur que notre calcul d'erreurs n'est valable que si les erreurs relatives sur chaque terme restent faibles, ce qui n'est évidemment pas toujours le cas. Cependant, nous appliquerons les méthodes classiques

qui nous donnent une idée suffisante de la précision globale.

Les expressions N et M sont alors égales, tout calcul fait :

$$N=1,875$$

$$M=0,820$$

Si l'on considère que l'énergie relative perdue dans le déferlement $E_d/E_i=0,5$ et l'énergie réfléchie $E_r/E_i=0,3$, on en déduit que l'erreur maximum de l'énergie transmise relative à l'énergie incidente est égale à :

$$\Delta E_t/E_i=0,2 \times 1,875=37,50 \%$$

et l'erreur probable :

$$\Delta E_t/E_i=0,2 \times 0,82=16,40 \%$$

Maintenant, si l'on considère que l'énergie absorbée dans la digue est égale à l'énergie transmise, l'erreur maximum faite sur t :

$$\Delta t/t=0,5 (1,875)=93,7 \%$$

et l'erreur probable :

$$\Delta t/t=0,5 \times 0,82=41 \%$$

Examinons maintenant les erreurs relatives entre modèles qui sont beaucoup plus faibles.

L'erreur faite sur d est uniquement due aux différences apportées dans la réalisation des modèles : elle dépend du dosage des mélanges et de leur tassement; elle n'excède donc pas 10 %; il en est de même de l'erreur faite sur ε , que l'on peut évaluer à 2 %.

L'erreur commise sur la charge efficace H_e est nulle si le profil extérieur est géométriquement semblable à celui de la nature puisque les coefficients K sont calculés pour la même amplitude.

Si le profil extérieur n'est pas le même (pente différente causée par distorsion), il s'ensuit une légère erreur dans l'appréciation de la différence des conditions à la paroi. Dans ce cas :

$$\frac{\Delta H_e}{H_e} = \frac{\Delta r}{1+r}$$

Si on évalue $\Delta r/r$ à 0,1, r à 0,5 :

$$\frac{\Delta H_e}{H_e} = \frac{0,05}{1,5} = 3 \%$$

L'erreur commise sur la largeur l est quasi-

ment négligeable quand on passe d'un profil à l'autre.

L'erreur commise sur C n'est plus due à une connaissance imparfaite des lois de l'écoulement puisque l'on travaille toujours sensiblement dans les mêmes conditions de turbulence (et à ce propos, il y a intérêt à comparer des modèles exécutés à la même échelle), mais aux différences dans l'appréciation des nombres de Reynolds entre les deux modèles.

Si l'on considère que sur le modèle le régime est toujours laminaire :

$$C = \frac{C_{ste}}{Ud}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta d}{d}$$

et l'on peut évaluer l'erreur maximum $\Delta C/C$ à 0,2 et l'erreur quadratique $\Delta C/C$ à 0,14.

Finalement, dans ce cas, les termes N et M deviennent, tous calculs faits :

$$N = 0,78$$

$$M = 0,30$$

Et l'on en déduit, dans les mêmes conditions déjà traitées, les erreurs maximums :

$$\frac{\Delta E_t}{E_t} = 0,78 \times 0,2 = 15,60 \%$$

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{2} \cdot 0,78 = 39 \%$$

et les erreurs probables :

$$\frac{\Delta E_t}{E_t} = 0,2 \times 0,30 = 6 \%$$

et :

$$\frac{\Delta' t}{t} = \frac{1}{2} \times 0,30 = 15 \%$$

Sans doute faudrait-il alors ajouter les erreurs fortuites dues aux mesures expérimentales qui, cette fois, ne sont plus négligeables devant les autres termes.

Conclusion.

Le choix définitif du profil d'une digue en enrochements dépend des données économiques et techniques.

Ces dernières sont généralement fonction des possibilités des carrières aux environs du port, des moyens de levage de l'entreprise qui exécute le projet, des conditions d'exploitation du port et des conditions de stabilité aux houles de tempêtes.

On ne se préoccupe généralement de la perméabilité que lorsque les houles se transmettent à travers la digue d'une façon gênante pour les usagers du port.

Le problème de la perméabilité des digues en enrochements peut maintenant être étudié avant leur réalisation, avec une précision suffisante pour les besoins de la technique.

Ce problème a son importance, non pas tant pour les houles, car on sait facilement s'en protéger, que pour les ondes de seiches qui se transmettent avec une grande facilité. Nous traiterons par ailleurs ce problème qui déborde le cadre de notre ouvrage, mais nous insisterons simplement sur son importance, dès que l'on craint l'effet

de seiches portuaires ().*

En conséquence, sans avoir résolu complètement le problème de la perméabilité des digues, nous espérons du moins avoir contribué à le résoudre et à en avoir examiné tous les aspects.

Il restera aux futures recherches à préciser l'influence de certaines variables pour lesquelles nos théories et nos essais n'ont pas apporté une complète solution. Il serait souhaitable, dans ce sens, de préciser l'influence de l'indice de vide, de l'effet de tassement dans le temps, etc.

Enfin, il serait utile d'analyser avec soin les caractéristiques des digues réalisées, afin de baser les futures recherches théoriques et expérimentales sur des données sûres. C'est seulement quand ces données seront obtenues qu'il sera rentable d'effectuer une analyse peut-être plus poussée que celle-ci. Notons cependant que les résultats présentés suffisent pour les besoins actuels de la technique portuaire.

(*) Pour résoudre le problème des seiches portuaires, nous ne voulons pas dire qu'il faut imperméabiliser les digues en enrochements, bien au contraire; le problème est trop complexe pour être analysé ici, aussi renvoyons-nous le lecteur à une prochaine publication.

BIBLIOGRAPHIE

1. K. TERZAGHI. — *Eng. News Record* 95, 1925, p. 382.
2. H. E. ROSE. — Fluid Flow through beds of granular materials Some aspects of fluid flow. *Edward Arnold and Co.*, London, 1951, p. 136.
3. H. LAFERRERE. — *Annales du Ministère de l'Agriculture*, 1938, fas. 67, p. 51.
4. L. ESCANDE. — *Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention*, A.I.R.H., sept. 1953, p. 547.
5. M. MUSKAT. — The flow of homogeneous fluids through porous media *McGraw Hill*, 1937, p. 763.
6. G. COHEN DE LARA. — *La Houille Blanche*, n° 2, mai 1953, p. 167.
7. G. SCHNEEBEL. — *La Houille Blanche*, mars-avril 1955, p. 111.
8. J. VALENSI ET G. CLARION. — *Bulletin de la Société Française des Mécaniciens*, n° 8, 2 trimestres 1953.
9. J. VALENSI ET C. CLARION. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1953, t. 237, n° 19, p. 1138.
10. J. VALEMBOIS. — Contribution à l'étude de la mesure des pressions variables. *Herman et C°*, 1948.
11. F. CRAUSSE. — *Publications Serv. Tech. du Ministère de l'Air*, 95, p. 42.
12. F. BIESEL. — *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 1950, p. 157.
13. T. H. HAVELOCK. — Forced surface waves on water, *Philosophical Magazine*, série 7, XVIII, 1929, p. 569.
14. F. BIESEL. — *La Houille Blanche*, 1951, p. 975.
15. J. KRAVTCHEKO. — *Proceedings of the fifth conference on Coastal Engineering*, sept. 1954, p. 50.
16. F. BIESEL ET B. LE MÉHAUTÉ. — *La Houille Blanche*, mars-avril 1955, p. 130.
17. L. GRESLOU ET Y. MAHÉ. — *Proceedings of the fifth conference on Coastal Engineering*, sept. 1954, p. 68.
18. A. WALLET. — Communication à la Société Hydrotechnique de France, juin 1951.
19. B. LE MÉHAUTÉ. — Le filtre à houle progressif, *La Houille Blanche*, n° 3, 1955, p. 4.
20. J. BOUDAN. — *La Houille Blanche*, n° 4, août-sept. 1953, p. 526.
21. J. VALEMBOIS. — Communication à la Société Hydrotechnique de France, 19-5-1952, p. 1.
22. B. LE MÉHAUTÉ. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, juillet 1957, p. 276.
23. B. LE MÉHAUTÉ. — Communication à la Société Hydrotechnique de France. *IV^{es} Journées de l'Hydraulique*, Paris, 1956, Question III, Rapport n° 4.
24. COHEN DE LARA. — Communication à la Société Hydrotechnique de France. *IV^{es} Journées de l'Hydraulique*, Paris, juin 1956, Question IV, Rapport n° 7.
25. E. O. MACAGNO. — *La Houille Blanche*, n° 1, janv.-fév. 1954, p. 10.