

Stabilité des digues à talus à carapace en vrac

Stability of rubble mound breakwaters with pell mell facings

PAR C. BEAUDEVIN

INGÉNIEUR AU LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE

Jusqu'à une époque assez récente, la détermination des caractéristiques d'une digue à talus ne pouvait être qu'empirique. Au cours de ces dernières années, divers auteurs ont proposé des formules permettant de serrer la réalité de plus près.

Dans cet esprit, les essais relatés ci-après permettent de mieux connaître les phénomènes liés à l'attaque d'une digue à talus par la houle; une méthode pratique de calcul est proposée; enfin, les résultats des essais sont comparés à ceux obtenus, dans d'autres laboratoires, au cours d'études analogues.

Until recently it was only possible to determine the characteristics of a rubble mound breakwater empirically. During the last few years several authors have proposed formulae allowing reality to be approached more closely. With the same end in view the tests described below enables the phenomena related to wave attack on a rubble mound breakwater to be better known. A practical method of calculation is proposed. Finally the results of the tests are compared with those obtained in other laboratories during similar studies.

PREMIÈRE PARTIE

CONCLUSION DES ÉTUDES

EFFECTUÉES AU LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE

I

Considérations générales sur la stabilité à la houle d'un massif formé d'éléments en vrac

Quoiqu'il puisse paraître à première vue, il n'est pas facile d'énoncer un critère qui permette de déterminer d'une manière précise la limite de stabilité d'une digue à talus. L'équation personnelle de l'observateur joue en effet le plus souvent un rôle que l'on ne peut négliger.

Nous avons cherché, au cours des essais relatés dans la présente communication, à éliminer autant que possible ce facteur subjectif et, dans

ce but, nous avons utilisé un critère de stabilité particulier : nous laissons la houle modeler elle-même une figure d'équilibre dans un massif homogène d'éléments en vrac. On vérifiera, au cours d'expériences ultérieures, que le profil ainsi obtenu est stable vis-à-vis des houles d'amplitude inférieure à celle qui l'a modelé, et qu'il est instable (c'est-à-dire qu'il y a chute de blocs) lorsque l'amplitude de la houle dépasse cette valeur.

Il est donc licite d'appeler ce profil « profil d'équilibre » et nous verrons plus loin que, compte tenu d'un coefficient de sécurité convenable, cette notion permet en pratique de déterminer des ouvrages stables.

II. — Profil d'équilibre caractéristique

Dans la plupart des cas rencontrés dans la pratique, le profil d'équilibre présente la forme indiquée par la figure 1. Cette forme d'équilibre est assez générale pour que nous l'ayons prise comme référence et dénommée « forme d'équilibre caractéristique ».

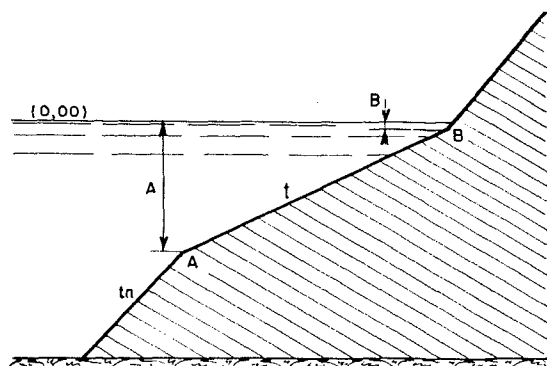


FIG. 1. — Profil d'équilibre caractéristique.

Nous définirons alors l'angle du plateau AB avec l'horizontale, et sa cotangente t respectivement comme « angle d'équilibre » et « talus (ou pente) d'équilibre » du matériau donné à la houle considérée.

En dessous du point A, de profondeur A, le talus est sensiblement au talus naturel t_n du matériau en eau calme.

Le « plateau » AB constitue la partie la plus intéressante d'un talus d'équilibre à la houle : il correspond à la carapace d'une digue. Nous allons chercher à déterminer tout d'abord, par des considérations simples, l'influence des divers paramètres sur les valeurs de la pente d'équilibre et sur les cotes A et B du plateau.

III. — Influence de divers facteurs sur la pente d'équilibre à la houle

FACTEURS DIMENSIONNELS

Les facteurs dimensionnels sont : l'amplitude $2a$ et la période T de la houle, la profondeur h au pied de l'ouvrage, enfin le poids P et la densité d des blocs composant le massif.

Les études que nous avons effectuées, rejoignant l'expérience classique, montrent que les termes *périodes de la houle* et *profondeur au pied de l'ouvrage* agissent seulement comme termes correctifs et qu'on peut, en première approximation, négliger leur influence. Il restera, par la suite, à les faire intervenir en tant que corrections.

Un calcul élémentaire permet de démontrer que les facteurs dimensionnels autres que la pé-

riode et la profondeur interviennent groupés en un nombre :

$$p = \frac{P}{(2a)^3} \frac{(d-1)^3}{d}$$

que nous appellerons « poids réduit ».

Il reste à définir expérimentalement la forme de la fonction $t = f(p)$ reliant la pente caractéristique au poids réduit, et à déterminer l'influence des termes *période* et *profondeur au pied de l'ouvrage*.

INFLUENCE DE LA PÉRIODE. — Nous avons effectué un certain nombre d'essais destinés à préciser cette influence; nous présentons, figure 2, quelques résultats obtenus en soumettant un massif à des houles de période 1 et 1,8 s.

La conclusion générale de ces essais est qu'une houle est d'autant plus dangereuse que sa période est plus faible, c'est-à-dire qu'elle est plus cambrée. L'influence de la période reste cependant presque toujours faible.

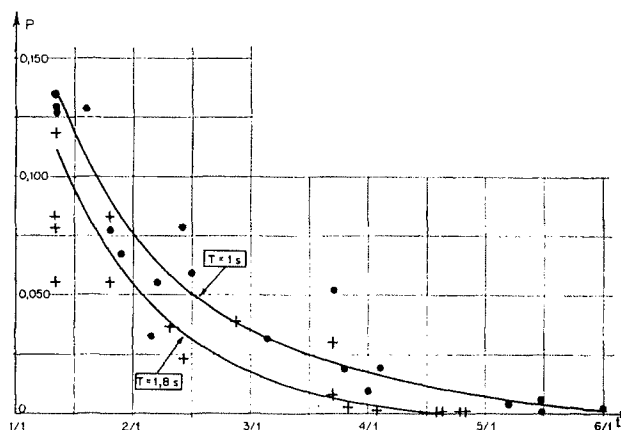


FIG. 2. — Pente d'équilibre à la houle d'un talus d'enrochements bruts. Influence de la période.

INFLUENCE DE LA PROFONDEUR. — Cette influence est complexe car, outre la valeur de la profondeur au pied de l'ouvrage, le profil des fonds au large de celui-ci intervient en effet.

Il semble qu'à condition de prendre en compte l'amplitude de la houle incidente devant l'ouvrage — et non l'amplitude de la houle au large — l'influence de la profondeur reste faible. L'ouvrage est d'autant plus affecté par la houle, à amplitude égale, que la profondeur est plus faible.

FACTEURS NON-DIMENSIONNELS

L'expérience peut seule déterminer l'influence exacte de ces paramètres: forme des blocs, profil initial du talus, échelonnement des poids des enrochements constituant la catégorie considérée.

INFLUENCE DE LA FORME DES BLOCS. — Au cours de nos essais, nous avons successivement considéré différentes formes de blocs : blocs cubiques à arêtes vives, blocs cubiques à arêtes émoussées, blocs arrondis (assez proche de sphères), enrochements à arêtes vives, enrochements à arêtes émoussées, tétraèdres, enfin sphères.

Les essais ont montré que les courbes $p = f(t)$ relatives à ces divers blocs se déduisaient sensiblement les unes des autres par affinité. Il est ainsi possible de caractériser chaque forme de blocs par un « facteur de forme » constant.

On peut ainsi dire que, toutes choses égales par ailleurs, un enrochement *émoussé* de 1 tonne possède une stabilité équivalente à celle d'un enrochement *brut de carrière* de 750 kg ou d'un bloc *cubique émoussé* de 500 kg ou enfin d'un bloc *cubique brut de décoffrage* de 350 kg.

Le fait que les courbes de stabilité relatives aux divers blocs considérés peuvent sensiblement se déduire les unes des autres par affinité, résulte d'une constatation expérimentale et cette conclusion se vérifie dans la quasi-totalité des cas de la pratique. Nous mentionnerons cependant une exception : il s'agit des blocs artificiels tétrapodes. Ceux-ci possèdent la curieuse propriété d'offrir une stabilité sensiblement équivalente aux pentes douces et aux pentes raides. Ce fait provient essentiellement du chargement réciproque des blocs qui se produit aux pentes raides.

Il en résulte qu'il y a intérêt en général à employer les tétrapodes en carapace en pente raide, de l'ordre de $4/3$, par exemple. Pour la pente $4/3$, toutes choses égales par ailleurs en particulier l'usure des blocs, il est sensiblement équivalent d'employer des tétrapodes de poids P , des blocs cubiques de poids $3P$ ou des enrochement de poids $6P$.

INFLUENCE DE L'ÉCHELONNEMENT DES POIDS À L'INTÉRIEUR D'UNE CATÉGORIE D'ENROCHEMENTS. — Ce facteur intervient lorsqu'il s'agit de définir le poids caractéristique P de la catégorie.

Nos essais nous ont amenés aux conclusions suivantes :

En règle générale, un mélange d'enrochements de diverses tailles possède un poids caractéristique égal ou supérieur au poids moyen des enrochements. Dans certains cas, on peut même dire qu'un mélange d'enrochements peut être équivalent aux blocs les plus lourds qui le composent. Ce fait peut s'expliquer facilement : lors de l'attaque du talus par la houle, les blocs légers placés entre les blocs plus lourds trouvent ainsi des logements qui leur offrent une certaine protection contre la houle en même temps que des appuis efficaces. On conçoit donc que la stabilité de l'ensemble des enrochements puisse être équivalente à celle des blocs les plus lourds.

On peut en conséquence admettre que le poids caractéristique intervenant dans le calcul de la stabilité est le poids moyen de la catégorie considérée. Dans la grande majorité des cas que l'on peut être amené à rencontrer, ceci revient à prendre une certaine marge de sécurité.

IV. — Influence des divers facteurs sur les cotes A et B du plateau

Cote de l'extrémité inférieure A du plateau

INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA HOULE. — Lorsqu'une houle d'amplitude lentement croissante aborde un talus, il n'y a d'abord pas d'attaque. Puis, pour une certaine valeur de l'amplitude, il apparaît un palier AB par chute des enrochements (fig. 1). La cote de l'extrémité inférieure A du plateau est alors sensiblement proportionnelle à l'amplitude de la houle. Si celle-ci s'accroît encore on constate, à partir d'une certaine valeur, que le talus présente une double cassure, le point A se dédoublant (fig. 3) en

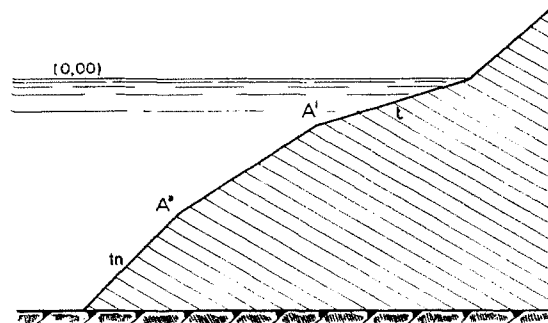


FIG. 3. — Talus à deux ruptures de pente.

deux points A' et A'' . Si l'amplitude augmente encore, A' reste fixe cependant que la profondeur de A'' continue à croître, sensiblement proportionnellement à l'amplitude.

INFLUENCE DE LA PÉRIODE DE LA HOULE. — Lorsqu'il n'existe qu'une seule cassure, sa profondeur A est sensiblement indépendante de la période. Lorsqu'il existe deux cassures, la cote de la plus profonde A'' est également sensiblement indépendante de la période, cependant que la cote de la cassure supérieure A' en dépend.

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS (POIDS, DENSITÉ ET FORME). — Ce paragraphe nous conduit à une conclusion très surprenante : les essais montrent en effet que la cote A de l'extrémité inférieure du plateau est pratiquement indépendante des caractéristiques des blocs et n'est fonction que de l'amplitude de la houle. Nous avons vu que A était proportionnel à l'am-

plitude; le terme de proportionnalité ne varie que fort peu avec les caractéristiques des blocs.

Au cours de nos essais où le poids réduit a varié de 1 à 200 (en valeur relative), le facteur de proportionnalité reliant A à l'amplitude a varié entre les valeurs extrêmes 1,6 et 1,2 (valeur moyenne 1,3).

Il peut paraître surprenant que la cote du point A à partir duquel les enrochements ne sont plus remués par la houle soit pratiquement indépendante des caractéristiques de ces enrochements. Ce fait est contraire aux règles couramment utilisées en travaux maritimes. Signalons cependant qu'avant nous, le brigadier BAGNOLD avait observé un phénomène analogue au cours des essais de stabilité des plages qu'il effectua sur modèle réduit. Il remarqua, en effet, que la profondeur à laquelle les galets ne sont pas susceptibles d'être déplacés par la houle est proportionnelle à l'amplitude de celle-ci et indépendante du diamètre des galets.

Le facteur de proportionnalité reliant cette profondeur à l'amplitude de la houle était de l'ordre de 1,1 à 1,4 ce qui rejoint bien les conclusions de nos essais en étendant encore leur domaine de validité.

INFLUENCE DE LA PROFONDEUR h . — Celle-ci semble faible.

Cote de l'extrémité supérieure B du plateau

La limite supérieure B du plateau AB est toujours proche du (0,00) quoiqu'en général très légèrement plus bas.

V. — Divers domaines définis au cours de cette étude

DOMAINE DES DIGUES ET DOMAINE DES PLAGES. — Lorsque le poids réduit est inférieur à une certaine valeur, de l'ordre de 2.10^{-3} , le profil d'équilibre n'est plus le profil d'équilibre caractéristique de la figure 2. Il peut alors prendre des formes plus complexes.

Cette valeur $p = 2.10^{-3}$ est obtenue, par exemple, pour des blocs de densité 2,8 de poids 1 kg, soumis à une houle d'amplitude 1 mètre.

Ces chiffres correspondent à une plage de gros galets. On voit que la condition $p = 2.10^{-3}$ marque sensiblement une limite entre les digues à talus et les plages de galets. Notre étude s'est donc limitée à cette valeur inférieure du poids réduit, au-delà de laquelle la notion simple de pente d'équilibre devient insuffisante.

STABILITÉ TOTALE ET STABILITÉ STATISTIQUE. — A l'intérieur du domaine des digues à talus peuvent être distingués deux modes de stabilité des blocs à la surface du talus, l'équilibre une fois établi :

- soit les blocs sont individuellement stables : on a « stabilité totale »,
- soit chacun d'entre eux peut être animé de mouvements alternatifs, autour d'une position moyenne et ceci sans que le profil du massif évolue si la houle l'attaque normalement : on a ce que l'on peut appeler « stabilité statistique ».

Ces deux domaines sont séparés par une valeur du poids réduit voisine de $p_0 = 22.10^{-3}$ pour des enrochements bruts de carrière.

Pour des enrochements émoussés, $p_0 = 30.10^{-3}$.

On a donc stabilité totale lorsque $p > p_0$ et stabilité statistique lorsque $p < p_0$.

Il est possible de tracer des abaques généraux concrétisant les divers résultats exposés jusqu'ici. Nous en donnerons comme exemple la figure 4, relative à des enrochements émoussés sans coefficient de sécurité.

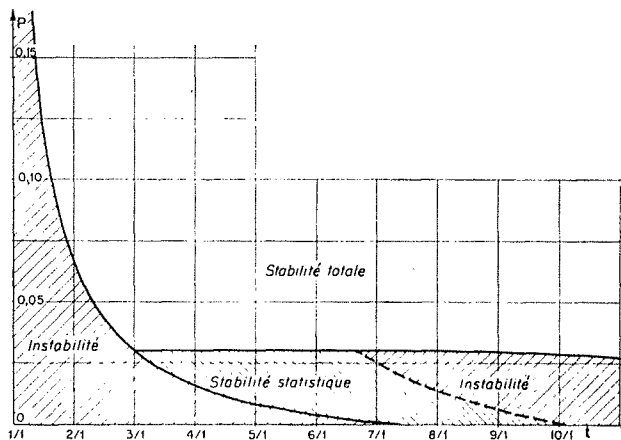


FIG. 4. — Stabilité à la houle d'un massif formé d'éléments en vrac.

Signalons enfin que nos essais ont permis de mettre en évidence l'existence d'une zone d'instabilité relative aux pentes trop douces composées de blocs trop légers. De tels talus sont remaniés par la houle, les éléments étant transportés vers le haut, cependant que la pente se raidit. L'évolution conduit à un talus plus raide que le talus initial, et représenté approximativement par la courbe en tirets.

DEUXIÈME PARTIE

AVANT-PROJET D'UNE DIGUE A TALUS A CARAPACE EN VRAC

Les digues à talus à carapace en vrac que l'on est amené à réaliser en pratique diffèrent, parfois notablement, de l'ouvrage schématique que nous avons considéré jusqu'ici. On peut cependant, moyennant certaines précautions, utiliser les résultats précédents pour le tracé de l'avant-projet d'une digue à talus.

DÉTERMINATION DE LA PENTE DE LA CARAPACE

Les essais que nous avons effectués permettent de déterminer la relation entre le poids réduit des éléments de carapace et la pente de celle-ci. Il reste cependant à définir le coefficient de sécurité dont il faut affecter ce poids réduit pour obtenir des garanties suffisantes de stabilité. Ce coefficient est assez élevé pour de multiples raisons. Il est à fixer par la pratique des travaux à la mer; il nous semble cependant que la valeur 2,5 (par rapport aux résultats bruts des essais) offre une sécurité convenable dans la majorité des cas.

Compte tenu de ce coefficient de sécurité 2,5, et considérant des blocs légèrement émoussés, on peut donner la formule pratique suivante (*) :

$$P = K (2a)^3 \frac{d}{(d-1)^3} \left(\frac{1}{t-0,8} - 0,15 \right) \quad (1)$$

$K = 0,25$ pour des enrochements,

$K = 0,12$ pour des blocs cubiques.

Cette formule est valable pour toutes les valeurs du poids réduit supérieures à $4,10^{-3}$; elle convient par conséquent dans la quasi-totalité des cas que l'on peut rencontrer en réalité. Elle ne prétend que condenser de façon aussi simple que possible les résultats expérimentaux et n'a pas de visées théoriques.

L'amplitude $2a$ intervenant dans la formule est l'amplitude locale de la houle à l'emplace-

(*) à titre indicatif, nous donnons ci-dessous les valeurs du coefficient K telles qu'elles résultent directement des essais, sans coefficient de sécurité :

- $K = 0,10$ pour des enrochements émoussés,
- $K = 0,075$ pour des enrochements bruts de carrière,
- $K = 0,050$ pour des blocs cubiques émoussés.
- $K = 0,035$ pour des blocs cubiques à arêtes vives.

ment de l'ouvrage. Elle peut être déterminée par des mesures directes, ou par l'emploi conjugué des abaques de prévision de houle et d'un plan de vagues.

Le poids P figurant dans la formule est le poids moyen (moyenne arithmétique) des enrochements formant la carapace ou le poids individuel des blocs cubiques. Enfin t est la cotangente de l'angle que forme, avec l'horizontale, la pente du talus.

Le poids donné par la formule (1) assure la stabilité statistique, c'est-à-dire que la pente t demeure inchangée, bien que les enrochements puissent être animés, à la surface du talus, de mouvements alternatifs si la valeur du poids réduit est trop petite. La *stabilité totale*, nécessaire pour éviter l'érosion de l'ouvrage par une houle oblique, sera assurée par la condition supplémentaire :

$$P > K' (2a)^3 \frac{d}{(d-1)^3} \quad (2)$$

$K' = 0,030$ pour des enrochements.

Cette valeur de K' ne comprend pas de coefficient de sécurité; celui-ci est à déterminer dans chaque cas particulier, en fonction de la gravité des attaques par des houles obliques.

DÉTERMINATION DE LA COTE INFÉRIEURE DE LA CARAPACE

On peut conclure de nos essais que, du strict point de vue résistance à la houle, l'ouvrage peut être constitué, sous la cote $(-1,3 \times 2a)$, par des blocs relativement légers, réglés à leur talus naturel d'équilibre en eau calme, sans que l'on ait à craindre d'érosions.

Cette valeur ne comprend pas de coefficient de sécurité, il est donc indiqué de tenir compte de l'action de la houle jusqu'à une profondeur quelque peu supérieure, par exemple 1,5 fois l'amplitude pour fixer les idées.

Il n'est cependant en général pas nécessaire de conduire la carapace elle-même jusqu'à la cote $(-1,5 \times 2a)$, car on peut, à sa partie inférieure, remplacer les lourds éléments de carapace par des blocs plus légers. Il s'agit alors de cas d'es-pèce qu'il est nécessaire de préciser par une étude particulière sur modèle réduit.

TROISIÈME PARTIE

RÉSULTATS OBTENUS DANS D'AUTRES LABORATOIRES

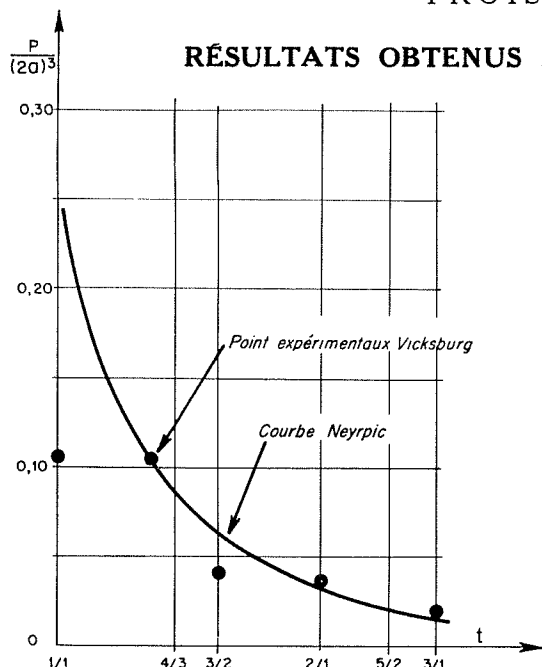


FIG. 5. — Résultats d'essais effectués à Vicksburg. Enrochements émoussés. Critère de « léger dommage ».

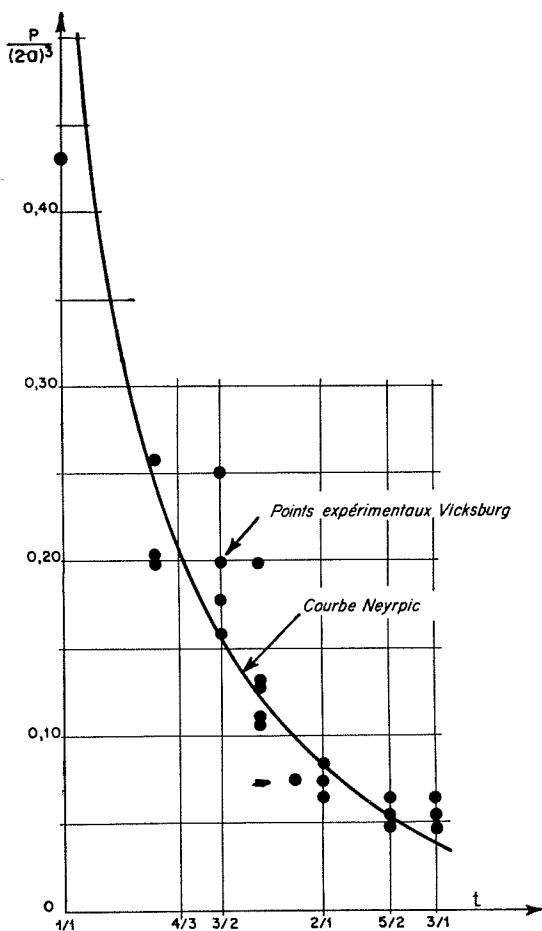


FIG. 6. — Résultats d'essais effectués à Vicksburg. Enrochements émoussés. Critère de « non-dommage ».

On peut citer un certain nombre d'études effectuées dans divers laboratoires, relatives à la détermination des digues à talus. A notre connaissance, toutefois, il n'existe qu'une seule étude assez systématique de ce problème. Elle fut effectuée en 1953 au « Waterways Experiment Station, de Vicksburg ».

Les modalités de cette étude diffèrent notablement de celles de nos essais. La comparaison que l'on peut faire entre les résultats dégagés par les deux laboratoires n'en est que plus intéressante. Les expérimentateurs américains ont été ame-

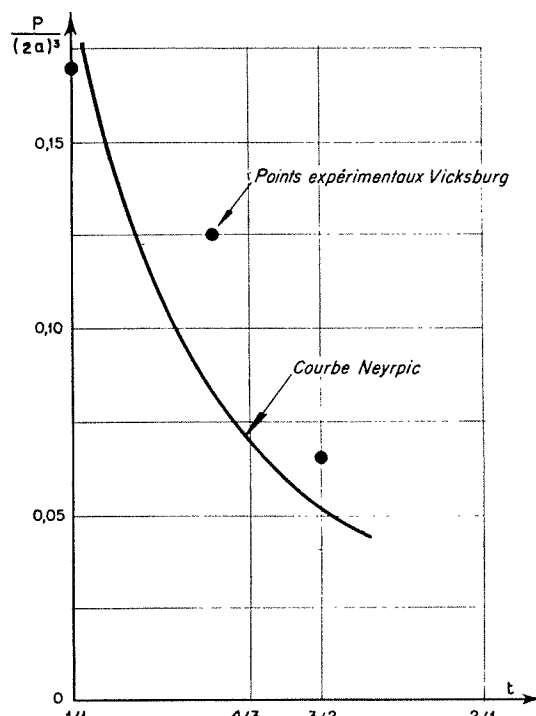


FIG. 7. — Résultats d'essais effectués à Vicksburg. Blocs cubiques bruts. Critère de « non-dommage ».

nés à définir deux critères de stabilité. Le premier, dit « critère de non-dommage », conduit à des ouvrages offrant toute garantie de stabilité. Il correspond donc à la formule pratique donnée plus haut.

Le second, dit « critère de léger dommage », correspond à un ouvrage dont la stabilité à la houle est limitée. Il correspond donc aux résultats bruts de nos essais, sans coefficient de sécurité.

Les points déduits des expériences américaines doivent donc se placer au voisinage des courbes résultant de nos essais. On voit sur les figures 5, 6 et 7 qu'il en est bien ainsi et que l'accord

peut être considéré en général comme satisfaisant.

Mais l'étude du laboratoire de Vicksburg offre d'autres conclusions intéressantes. En particulier, elle a permis de constater que les blocs arti-

ficiels cubiques possédaient une stabilité supérieure à celle d'enrochements naturels de même poids et densité. La comparaison des figures précédentes illustre bien cette conclusion, qui est également celle de nos essais.

CONCLUSION

Nous voudrions, pour conclure, revenir sur quelques points particuliers que nos études ont pu mettre en évidence et qu'il nous semble intéressant de souligner.

1° Le talus naturel, voisin de $4/3$, est stable vis-à-vis de houles d'amplitude non négligeable (d'autant plus fortes que le poids des éléments est plus grand (*)).

2° Une houle attaque d'autant plus durement un talus, à amplitude égale, que sa période est plus faible. Les houles les plus cambrées sont donc les plus dangereuses pour la carapace d'un ouvrage.

3° Les blocs artificiels cubiques sont sensiblement équivalents à des enrochements de poids double et d'usure comparable. Il apparaît donc que les blocs artificiels en vrac possèdent une stabilité supérieure à celle des enrochements naturels (**).

4° La profondeur limite d'action d'une houle, sur une catégorie d'enrochements, c'est-à-dire la profondeur jusqu'à laquelle il est possible de monter un talus naturel formé de ces enroche-

ments sans constater d'érosion, dépend peu du poids des enrochements et n'est fonction pratiquement que de l'amplitude de la houle.

Nous tenions à attirer l'attention sur ces quelques points, qui ne sont pas toujours conformes aux idées généralement admises.

(*) Ces conclusions rejoignent bien celles que M. l'Ingénieur SURLEAU, Chef d'Exploitation du port de Casablanca, expose dans un récent numéro de la revue Travaux. Il note en effet que la carapace de la jetée Delure, formée de blocs artificiels de 100 T et réglée à la pente $1/1$, résiste sans adoucissement aux fortes houles qu'elle subit.

(**) Ce point particulier méritait d'être mis en évidence. Nous n'en citerons comme application que le brise-lames Est de Mers-el-Kébir où des blocs cubiques en vrac posés à la pente $2/1$ sont mis en place pour résister à des houles de 8 mètres d'amplitude. Le poids de ces blocs a été déterminé par des études sur modèle réduit : il est de 40 T. Appliqué à ce cas particulier, notre formule donnerait un chiffre de 36 T. Nous signalerons que des blocs cubiques de 27 T posés sur cet ouvrage selon la pente $2/1$ ont, au mois d'avril 1954, subi sans dommages une houle de plus de 7 m d'amplitude.

DISCUSSION

Président : M. WAHL

M. MICHE remarque que la cote $— 1,3 \times 2 a$, au-dessus de laquelle les enrochements sont déplacés, et qui est par conséquent fonction de l'amplitude de la houle, doit être en relation directe avec le début du déferlement sur le talus, ce qui pourrait être la raison de la faible influence sur cette profondeur d'instabilité, de la densité et de la forme des enrochements.

M. BEAUDEVIN pense qu'effectivement la stabilité du talus au-dessous de cette profondeur indique une différenciation de l'effet de la houle de part et d'autre de la cote du déferlement.

M. MICHE suggère, d'autre part, d'étudier l'influence du facteur « temps », c'est-à-dire de déterminer après combien de cycles de houle, l'état limite de stabilité est atteint : cette étude lui paraît importante pour le cas de très fortes tempêtes qui peuvent ne pas être très longues tout en étant très dangereuses pour l'ouvrage ; or, les recherches de nombreux laboratoires, qui

concluent, comme celles rapportées par M. BEAUDEVIN à l'indépendance de la période ne paraissent concerner que l'état limite, c'est-à-dire celui atteint après un assez grand nombre de cycles de houle.

M. BEAUDEVIN indique que, pour des études particulières, le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique a l'habitude de considérer l'action de la houle pour un temps limite, ce qui introduit un paramètre de plus, dont l'étude systématique qu'il a exposée avait précisément pour but de se libérer en ne considérant que l'équilibre limite au bout d'un temps suffisamment grand. Il ajoute que, dans l'étude du Laboratoire américain de Vicksburg, les auteurs ont vérifié que la similitude s'appliquait à cet état d'équilibre provisoire.

Répondant à deux questions de M. RIDET, M. BEAUDEVIN indique :

1° Qu'en l'absence d'étude systématique sur les blocs arrimés jointifs, on peut cependant conclure

d'études particulières que la stabilité d'un ouvrage ainsi conçu et pour lequel les conditions d'appui et l'influence des sous-pressions ont été soigneusement déterminées, nécessite des blocs de poids moindre que les carapaces en vrac, mais que celles-ci sont moins fragiles et plus facilement rechargeables après une tempête.

2° Que, dans les mers à marée, on peut établir un profil qui répond dans sa partie supérieure aux conditions de stabilité à marée haute et, dans sa partie inférieure, aux mêmes conditions à marée basse.

M. RIDET estime cependant qu'il peut parfois n'être pas facile de concilier les deux conditions.

Répondant à une question de M. LAZARD, M. BEAUDEVIN indique que les essais particuliers de carapace en vrac comportent toujours deux couches de blocs, que les essais exposés ici, effectués en canal vitré, ont porté sur des massifs homogènes, mais que leurs résultats relatifs à la carapace sont applicables aux ouvrages *in situ* dont les noyaux sont constitués de blocs tout venants, d'après les études du Laboratoire de Vicksburg.

M. le Président précise que de tels ouvrages nécessitent, entre tout venant et carapace, des couches intermédiaires dont il faudrait aussi déterminer la granulométrie pour aller jusqu'au fond du problème.

M. BEAUDEVIN estime que cette granulométrie est fixée par une condition de filtre — il faut éviter que les petits enrochements ne filtrent à travers les interstices des grands qui les recouvrent — et par une condition de stabilité dans les phases de la construction.

M. MICHE constate que les résultats exposés par M. BEAUDEVIN autoriseraient *a priori*, pour les digues à talus, l'emploi de remblais de sable à 10 mètres de profondeur pour des houles allant jusqu'à 7 m de creux. Or, pratiquement, on n'utilise pas dans ces conditions de remblais de sable à moins de 25 mètres et de petits enrochements à moins de 15 mètres de profondeur. Il semble donc qu'il y ait, en dehors de la stabilité apparente ou « statistique » de la surface du talus, certains facteurs d'instabilité avec le temps, tels que l'aspiration des matériaux fins. En tout cas, ceci mériterait d'être élucidé, car si ces résultats indiqués étaient définitivement confirmés, on pourrait être conduit à des économies substantielles dans l'exécution des ouvrages.

M. BEAUDEVIN fait remarquer que ces économies, portant sur des matériaux en général peu coûteux, doivent rester assez limitées, d'autant plus qu'elles doivent laisser subsister une marge de sécurité suffisante. Par ailleurs, ainsi qu'il a été précisé au cours de l'exposé, le domaine exploré au cours des essais est limité aux matériaux de la classe du tout-venant et on ne peut extrapoler les résultats à des matériaux plus petits, sable par exemple.

M. FOREST signale la possibilité d'attribuer les incertitudes des résultats à un effet d'échelle sur le mode de déplacement des matériaux sous l'effet de la houle, observé au Laboratoire National d'Hydraulique : les échelles des essais du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique sur lesquels a porté l'étude systématique de M. BEAUDEVIN évoluant entre 1/25 et 1/100, il est possible que, pour un même profil, les matériaux se déplacent par roulement dans les modèles au 1/50 et par saltation au 1/25.

Le fait, que dans les expériences de M. BEAUDEVIN, les phénomènes de saltation aient été diminués par suite de l'effet d'échelle, explique les grandes variations, en fonction de leur forme, du poids des blocs à stabilité égale. joue un rôle bien plus important pour le roulement que pour la saltation.

Pour passer aux phénomènes naturels, il y a donc lieu de resserrer la gamme des poids des blocs à stabilité égale et de ne pas attribuer une trop grande importance aux possibilités d'encastrement des blocs.

M. BEAUDEVIN estime que cet effet d'échelle doit être négligeable.

M. DEVIMEUX rappelle que, dans une communication au Comité Technique de la S.H.F. concernant l'étude générale du déferlement de la houle, effectuée au Laboratoire Central d'Hydraulique de France, à Maisons-Alfort en 1949-1950, M. LARRAS a signalé l'apparition d'un certain effet d'échelle, lorsque la période de la houle en canal est inférieure à 3 s : pour une valeur donnée de l'amplitude de la houle au large, la houle en canal déferle par profondeur plus faible que dans la réalité; par ailleurs, à amplitude égale au point de déferlement, la houle en canal déferle par profondeur plus forte que dans la nature. Cet effet ne devient sensible que lorsque la période de la houle descend au-dessous de 2 s. Au-dessus de cette valeur, il est faible et ne permettrait de jeter un doute sur la validité des expériences.

M. BRAUDEAU se demande si cet effet d'échelle ne provient pas de la différence des perméabilités du modèle et de l'ouvrage en place.

M. BEAUDEVIN croit qu'il y a en somme une double cause de la différence entre les résultats du modèle et le comportement de l'ouvrage :

- 1° La différence entre le modèle homogène et l'ouvrage formé d'une carapace et d'un noyau de granulométrie différentes;
- 2° La différence des perméabilités à la houle; cette dernière cause fait l'objet d'études en cours au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique desquelles on peut, dès maintenant, conclure qu'il faut construire la carapace de l'ouvrage réel avec des éléments plus gros que ceux que donnerait l'application de la similitude de Froude, mais que ce grossissement est inutile sous la carapace.

M. le Président remercie M. BEAUDEVIN.