TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION DES BARRAGES EN PIERRES LANCÉES DANS L'EAU COURANTE

CH. BLANCHET,

Ingénieur aux Ateliers Neyret-Beylier et Piccard-Pictet

Dans une publication précédente⁽¹⁾, nous avons donné les règles élémentaires essentielles de l'équilibre des pierres de surface d'un massif en formation dans un courant d'eau.

Nous allons maintenant, comme première application de ces résultats, examiner la construction, dans l'eau courante, des barrages en enrochements.

Parmi toutes les méthodes de construction de ces barrages, nous examinerons uniquement celle qui consiste à jeter les blocs suivant une ligne transversale au courant, en répartissant très régulièrement les jets pour que, durant toute sa construction, le massif s'élève uniformément dans le sens transversal.

Nous donnerons, tout d'abord, les bases du calcul des massifs en considérant un cas idéal simple. Pour cela, nous reproduirons, en abrégé et avec quelques modifications, la théorie publiée par M. ISBACH. Nous signalerons, ensuite, les faits essentiels que l'on rencontre dans la pratique de cette construction. Enfin, dans un troisième et dernier chapitre⁽²⁾, nous exposerons comment pour éviter l'onéreuse opération du triage des enrochements inhérente à la théorie de M. ISBACH, nous avons conçu une technique employant du tout-venant. Cette dernière méthode a été utilisée pour la construction du batardeau de coupure du Rhône à Génissiat.

(1) *Houille Blanche*, n° 2, Mars 1946.

(2) Prochain numéro de la *Houille Blanche*.

NOTATIONS

q	=	débit unitaire déversant sur le massif.
q'	=	débit d'infiltration à travers le massif.
$\mathcal{H}$	=	Hauteur du plan de charge à l'amont du massif.
H_1	=	Hauteur de la crête du massif.
H_2	=	Hauteur du massif à la fin de la zone de mise en vitesse.
H_3	=	Hauteur du massif à l'aval pendant la troisième configuration.
H_4	=	Hauteur aval du profil d'équilibre pendant la quatrième configuration.
h	=	profondeur de l'écoulement uniforme, à l'amont.
h'	=	profondeur de l'écoulement uniforme, à l'aval.
$h_{crit.}$	=	profondeur critique pour le débit déversant sur la crête du massif.
h_2	=	profondeur d'eau normale dans la rivière à l'aval du massif.
V_{min}	=	Vitesse moyenne minimum de formation du massif.
V	=	vitesse moyenne normale de formation du massif.
V_0	=	vitesse moyenne à l'amont du massif.
i	=	pente de l'écoulement à régime uniforme sur le massif.
i_0	=	pente du fond de la rivière.
M	=	Coefficient de mise en vitesse sur la crête déversante.
l_1	=	longueur de la zone de mise en vitesse.
l	=	longueur de la zone à écoulement uniforme.
L	=	longueur totale du massif à la base.
l'	=	longueur d'infiltration.
D	=	diamètre moyen des pierres ramenées à une sphère.
ρ	=	porosité des pierres.
Co'	=	coefficient expérimental d'infiltration.
Z	=	perte de charge par infiltration.

Photo 1

Photo 3

Photo 2

Photo 4

CHAPITRE I

THEORIE DE LA FORMATION DES BARRAGES

Description de la formation du massif.

— Comme l'a fait M. ISBACH dans sa publication (3), nous allons donner les schémas de calcul pour une rivière dont les caractéristiques, les plus simples que l'on puisse imaginer, seraient :

— un tracé rectiligne, une section rectangulaire uniforme à parois fixes et à grande largeur vis-à-vis de la profondeur, un débit constant, un écoulement uniforme, à faible pente.

Nous allons tout d'abord décrire ce que l'on observe lorsque l'on jette des blocs régulièrement et simultanément sur toute la largeur du lit, à partir d'une ligne transversale. On suppose que les blocs de grosseur homogène ne sont pas entraînés par le courant normal de la rivière.

Configuration n° 1 (fig. 1, photo 1). — Il se forme tout d'abord un massif prismatique à section triangulaire, qui ne diffère de celui que l'on obtiendrait en l'absence de courant, que par le décalage de sa crête par rapport à la ligne

(3) *Annales de l'Institut Hydrotechnique de Recherches scientifiques en U.R.S.S.*, Moscou, Tome XVII — 1935.

de lancement des blocs et par l'inégalité de fruit des deux talus d'éboulement amont et aval.

L'obstacle que le massif constitue pour l'écoulement, provoque une élévation de la ligne d'eau en amont, une augmentation des vitesses au passage sur le massif et l'établissement à l'abri du massif d'un rouleau à axe horizontal.

La vitesse de l'eau sur la crête du massif augmente à mesure qu'il s'élève jusqu'à atteindre la vitesse minimum d'entraînement (pierre sans appui arrière).

Configuration n° 2 (fig. 2, photo 2). — L'élévation du massif marque alors un temps d'arrêt. Les pierres, ayant à lutter contre un courant qui atteint, puis dépasse la plus petite vitesse nécessaire à leur entraînement, vont s'accumuler de manière qu'en surface elles soient partout en équilibre limite.

Nous avons vu qu'il y a une vitesse maximum qui n'est pas dépassée dans la formation d'un massif, c'est celle qui correspond à l'équilibre limite des blocs dans la position 2. La surface du massif va donc se modeler de manière à amener l'écoulement à cette vitesse, ce qui donne, finalement, au massif, un profil à crête épaisse légèrement arrondie.

On considère que cette configuration cesse lorsque la longueur du massif permet l'établissement, à son extrémité, de la vitesse V de formation des massifs sur fond plat.

Configuration n° 3 (fig. 3, photo 3). — Toutes les nouvelles pierres jetées vont donc maintenant s'arranger pour maintenir la vitesse V , c'est-à-dire un écoulement en régime uniforme; le massif prend donc le profil qui maintient ce régime, c'est-à-dire essentiellement une pente constante.

Cet auto-régulation du régime de l'écoulement crée un schéma d'écoulement à l'aval extrêmement favorable à la formation du massif. En effet, l'écoulement sur le massif se poursuit dans la rivière, par un jet de surface, situé sensiblement à son niveau tandis que se maintient le rouleau de fond dont nous avons parlé pour la configuration 1. La vitesse V sur le massif étant plus grande que la vitesse dans la rivière, la zone à régime uniforme sera décalée vers le haut, par rapport au fond de la rivière. La différence est rattrapée par un talus d'éboulement. Le rouleau de fond qui donne un contre-courant au pied du massif empêche la dispersion des blocs et favorise la formation régulière du talus. L'expérience et un raisonnement par élimination montrent que l'écoulement s'établit normalement sous cette forme.

Le sommet du talus aval est donc, par rapport au niveau aval, à une altitude bien déterminée; il en résulte que tout allongement du massif s'accompagne d'un exhaussement

puisque la pente de la rivière est, d'après les données, plus faible que la pente de régime uniforme sur le massif.

La figure 5 suffit à expliquer le mécanisme de l'allongement et de l'élévation simultanée du massif. Dans cette configuration, la surface du massif présente quatre zones distinctes :

Fig. 5. — MÉCANISME DE L'ALLONGEMENT ET DE LA MONTÉE DU MASSIF

- 1° le talus de soutien amont, dont le fruit m est voisin de $1/1$ en raison de la poussée hydrodynamique.
- 2° la zone de mise en vitesse formant déversoir à large seuil plus ou moins arrondi.
- 3° la zone à écoulement uniforme qui absorbe, par sa perte de charge linéaire constante, une partie de la chute créée par le barrage.
- 4° un talus de soutien aval.

Une autre partie de l'énergie de la chute, celle qui correspond à l'énergie cinétique de l'eau est partiellement dissipée par turbulence dans la

Photo 5.

rivière à l'aval et partiellement récupérée sous forme d'énergie potentielle.

Configuration n° 4 (fig. 4, photo 4). — Si, pour une raison quelconque, existence d'une courte galerie de dérivation par exemple, le débit diminue à mesure que le massif s'élève sans que le niveau aval change, l'allongement du massif cesse à un certain moment et tous les blocs jetés servent à son élévation. Le massif finit par émerger.

Durant toute cette construction, on peut observer un écoulement par infiltration dans le massif très perméable. L'eau pénètre par le talus amont et ressort essentiellement dans la zone à écoulement uniforme. Dans le talus aval, on observe, au contraire, en général, une infiltration en contre-courant, due à la différence de pression que crée la récupération partielle de l'énergie cinétique dans le phénomène d'écoulement aval.

Après cette description rapide des phénomènes, nous allons exposer le calcul des différentes phases, en nous aidant des schémas d'écoulement correspondants.

Calcul de la configuration n° 1 (fig. 6). — Dans la pratique, cette configuration ne se présente, telle que nous l'avons décrite, que si les jets de blocs suivant une ligne fixe, sont identiques à tous points de vue.

Fig. 6. — PREMIERE CONFIGURATION

Fig. 7. — DEUXIEME CONFIGURATION

Le seul calcul qui peut présenter de l'intérêt, est celui du profil limite de la configuration. Il y a trois phénomènes hydrauliques à calculer : la mise en vitesse, la restitution aval, l'infiltration.

La hauteur d'eau sur la crête du massif sera :

$$h = \frac{q}{V_{\min}}$$

Par le théorème de BERNOULLI et celui des quantités de mouvement, on peut calculer la hauteur du massif d'une manière plus complète que ne l'a donnée M. ISBACH qui néglige la transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle dans le phénomène de restitution aval.

En faisant l'hypothèse que le talus aval est soumis à une pression moyenne entre celle d'aval et celle qu'il y a sur la crête, on a :

$$H_1 = (h_2 - h) \left[1 - \frac{2 q^2}{g h_2 h (h_2 + h)} \right]$$

L'altitude du plan de charge en amont du massif sera $\mathcal{H} = H_1 + h + M \frac{V_{\min}^2}{2g}$

M étant un coefficient qui tient compte de la répartition des vitesses et des pertes de charge à la mise en vitesse.

Connaissant l'altitude du plan de charge, le débit et le profil de la rivière, on calcule facilement le niveau d'eau à l'amont. Pour cette première configuration, on peut négliger le débit d'infiltration. S'il y a une galerie de dérivation en service dont on connaît la loi hauteur-débit, on opère par approximation successive jusqu'à ce que l'on trouve le massif qui correspond à l'égalité des débits de la rivière et des ouvrages.

Les fruits des talus amont et aval peuvent être pris respectivement égaux à 1/1 et 3/2.

Calcul de la 2° configuration (fig. 7). — Ici, encore, nous ne calculerons que le profil limite. M. ISBACH distingue deux cas du calcul, suivant que la vitesse V d'équilibre limite des blocs est inférieure ou supérieure à la vitesse critique et il utilise, pour le second cas, une formule de déversoir épais. Il nous paraît plus juste et plus commode de supprimer cette

distinction. Pour cela, au lieu de faire porter les calculs sur le sommet du seuil déversant, il suffira de le faire sur le point du massif où débute la vitesse V . Dans cette configuration, ce point est, par définition, le sommet du talus aval.

On aura encore :
$$h = \frac{q}{V}$$

$$H_2 = (h_2 - h) \left(1 - \frac{2q^2}{2h_2 h (h_2 + h)} \right)$$

Côté du plan de charge :

$$\mathcal{H} = H_2 + h + \frac{V^2}{2g}$$

On en déduira la cote du plan d'eau amont, après plusieurs approximations s'il y a une galerie.

La longueur de la surface active de mise en vitesse est donnée empiriquement par M. ISBACH :

$$l_1 = 3 h_{\text{crit.}} = 3 \sqrt{\frac{3}{g} \frac{q^2}{g}}$$

Cette formule qui ne tient pas compte des vitesses d'approche et des caractéristiques des pierres, n'est probablement pas très exacte. La hauteur H_1 de la crête du massif un peu plus grande que H_2 est, à notre avis, assez difficile à déterminer ; comme elle ne représente qu'un détail de forme du massif, sa connaissance exacte n'est pas capitale.

Le débit d'infiltration peut encore être négligé, d'autant plus qu'il est restitué sur la surface de mise en vitesse.

Calcul de la 3^e configuration (fig. 8). —

Le calcul est fait pour un profil quelconque pris dans cette configuration. Il peut être conduit de différentes manières, suivant qu'il y a ou non une galerie de dérivation, que l'on cherche la surélévation de niveau que donne telle longueur du barrage ou inversement la longueur qui produira une élévation donnée, etc.

Fig. 8. — TROISIÈME CONFIGURATION

Nous donnons ci-après les formules de calcul que nous avons modifiées, par rapport à celles de M. ISBACH pour mieux tenir compte théori-

quement des phénomènes à la restitution aval, du fait que le débit d'infiltration ressort sur la partie active du massif et de la pente i_0 de la rivière :

$$h' = \frac{q + q'}{V} \quad h = \frac{q}{V}$$

$$H_3 = (h_2 - h') \left(1 - \frac{2(q + q')^2}{gh_2 h' (h_2 + h')} \right)$$

$$i = \frac{V^2 n^2}{\left(\frac{h + h'}{2} \right)^{4/3}}$$

Ce qui suppose que la largeur de l'écoulement est grande vis-à-vis de la profondeur - Rayon hydraulique = h

On peut encore l'écrire :

$$i = \frac{V^{10/3} n^2}{\left(\frac{2q + q'}{2} \right)^{4/3}} \quad H_2 = H_3 + l (i - i_0) \quad l_1 = 3 \sqrt{\frac{q^2}{g}}$$

$$\mathcal{H} = H_2 + h + B \frac{V^2}{2g}$$

$$q' = H_2 \text{Co} \cdot \rho \sqrt{\frac{D Z}{P}}$$

$$Z = \mathcal{H} - h_2 - \frac{V_2^2}{2g}$$

La longueur totale du massif comptée sur le fond est :

$$L = m_1 H_1 + l_1 + l + m_2 H_3$$

Le plus souvent, le profil le plus intéressant à calculer est celui qui atteint la longueur maximum, c'est-à-dire celui qui correspond à l maximum ; on a :

$$l = \frac{H_2 - H_3}{i - i_0} \quad (H_2 - H_3) \text{ croît forcément avec le volume de pierres jetées.}$$

Pour que l passe par un maximum, i doit donc augmenter d'une certaine manière. Ceci suppose, si l'on considère les formules donnant i , que la somme des débits $2q + q'$ diminue d'une certaine quantité, en fonction du volume de pierres jetées. Il faut donc qu'il y ait soit une dérivation à débit croissant avec la charge, soit une diminution de débit de la rivière, soit une construction très rapide du barrage permettant une diminution suffisante du débit par accumulation à l'amont. Le calcul de la longueur maximum sera, en général, facilement obtenu par approximations successives. Il peut arriver, pour les massifs très poreux, que le massif émerge sans que la condition d'allongement maximum soit satisfaite à l'extrémité ; mais

alors il n'y a plus de raison de continuer à jeter des pierres.

Calcul de la 4^e configuration (fig. 9). -- Elle commence lorsqu'on arrive à l'allongement maximum et se termine à l'émergement.

Le calcul de cette configuration ne diffère du précédent que par la condition aval qui, au lieu

Fig. 9. — QUATRIÈME CONFIGURATION

d'être donnée par la rivière aval, est donnée par la zone en excès du massif sur laquelle les pierres ne sont plus à la limite de leur équilibre, et sur laquelle l'écoulement est retardé. On simplifiera beaucoup les calculs, sans introduire en général de grosses erreurs, en supposant que cette partie en excès n'existe pas ; les calculs seront alors conduits d'une façon identique à ceux de la 3^e configuration.

Exceptionnellement, on aura à tenir compte de cette zone en excès ; il faudra alors procéder au calcul de la ligne d'eau en régime retardé sur le profil précédent, et opérer par approximations successives, en choisissant la position de H_1 jusqu'à faire cadrer toutes les données.

Conduite générale des calculs. — Les méthodes sont très diverses, suivant les données, mais en général, on sera conduit à calculer des profils connaissant le diamètre des pierres et les débits.

S'il n'y a pas de galerie de dérivation, connaissant le débit de la rivière, on calcule facilement les configurations 1 et 2 et pour la configuration 3, on se donne soit l soit $\mathcal{H}$, on fait une estimation pour q' , on en déduit q et on calcule successivement : h' , H_3 , h , i , H_2 puis q' ; on refait les calculs avec ce dernier débit jusqu'à retrouver la même valeur qu'au départ. On procède ainsi pour différentes longueurs.

Si l'on y a une galerie de dérivation, on se donne la hauteur d'eau amont, on en déduit $\mathcal{H}$ et $q + q'$, on fait une estimation de q' et l'on calcule H_*, i ; on en déduit l , on recalcule q' . Si ce dernier n'est pas égal à celui estimé, on recommence les calculs.

La traduction en courbe des résultats obtenus pour chaque profil facilite, par extrapolation, la poursuite des calculs et évite de nombreux tâtonnements.

La photo n° 5 montre les profils successifs d'un massif construit avec un débit et un niveau aval constants.

On sera souvent amené à examiner, pour un massif existant, l'effet de variation de débits ou de hauteurs d'eau aval, ou tout autre facteur.

Si, par exemple, on veut connaître ce que devient un massif, primitivement en équilibre sous un certain débit, lorsque ce débit vient à changer, on commence par calculer le profil qui, construit avec ce débit, aurait donné le même volume de pierres.

La superposition des deux profils permet alors de voir ce que sera le vrai profil, en tenant

Fig. 10. — EFFETS DIVERS DES VARIATIONS DE DÉBIT ET DE NIVEAU AVAL SUR UN MASSIF PRÉALABLEMENT EN ÉQUILIBRE POUR LE DÉBIT $Q - Q'$ DÉBIT INITIAL, Q' NOUVEAU DÉBIT. AL DU MASSIF INITIAL. H_3 HAUTEUR NOUVEAUX VALEURS SONT CALCULÉES À PARTIR DU T D DU NIVEAU AVAL DE LA RIVIÈRE.

compte que les pierres ne peuvent se déplacer que de l'amont vers l'aval et qu'elles doivent subir, pour cela, une poussée hydrodynamique suffisante.

La planche n° 10 donne divers remaniements d'un massif, qui primitivement, était en équilibre sous le débit Q_0 et la cote aval h_2^0 . Suivant la loi hauteur-débit de la rivière aval ou les modifications que l'on peut faire simultanément à l'aval, on aura différentes formes caractérisées par la valeur H_3 prise comme critère.

CHAPITRE II

PHENOMENES OBSERVES LORS DE LA CONSTRUCTION DU BARRAGE

I. — Affouillements dans les constructions sur lit alluvionnaire

Dans la plupart des cas, le barrage sera construit sur un lit alluvionnaire, et l'on aura, au cours des travaux, diverses sortes d'affouillements du lit.

Affouillements autour de gros blocs isolés. — Nous avons déjà décrit ces phénomènes dans notre précédente publication⁽¹⁾. Les gros blocs jetés sur des alluvions plus ou moins fines peuvent, soit être emportés par manque d'appui, soit s'enfoncer par affouillements. Pour éviter ces deux inconvénients, il faut que la grosseur des blocs soit par rapport à la grosseur des alluvions telle que leur vitesse limite d'entraînement, compte tenu des appuis du fond, soit supérieure à la vitesse de la rivière, et que l'augmentation locale des vitesses causées par les gros blocs ne dépasse pas notablement la vitesse d'entraînement des alluvions du fond. On peut avoir intérêt à jeter autour d'un gros bloc des pierres de grosseurs intermédiaires de manière à combler et arrêter l'affouillement. Il y a pour ces dernières une granulométrie optimum. Remarquons que la protection par des enrochements, des piles de ponts ou autres, pose un problème identique.

Affouillements par le courant d'infiltration dans le massif. — A l'amont du massif, la retenue créée par le barrage réduit suffisamment les vitesses pour qu'en général il ne se produise pas d'affouillements à l'approche du massif. Mais l'eau qui s'infiltre à travers le massif peut s'écouler avec des vitesses supérieures à celle de l'équilibre du fond. On observe alors un

entraînement de lit alluvionnaire sous le barrage qui s'enfonce comme le montre la fig. 11.

D'une manière générale, l'enfoncement est nul au pied du talus amont, maximum sous la zone de mise en vitesse, tandis que se produit, en général, un comblement des vides dans la partie aval du massif, comme le montre la fig. 11.

Cet enfoncement a deux inconvénients majeurs : il augmente le volume de matériaux nécessaires à la construction du barrage et peut-être une cause initiale de formation des brèches dans le massif en cours de construction comme nous le verrons plus loin.

Le moyen de protection le plus simple et le plus avantageux consiste à commencer le massif avec des matériaux de grosseur intermédiaire ou progressivement croissante ou de granulométrie telle que les vides soient faibles. On constitue ainsi, sur le fond alluvionnaire, un noyau qui, par sa plus faible perméabilité, éloigne du fond le courant principal d'infiltration et réduit considérablement les vitesses dans la zone la plus sensible aux affouillements.

Fig. 11. — NOYAU DE PROTECTION DU LIT ALLUVIONNAIRE

Il n'est pas nécessaire que le noyau soit très haut pour être efficace, mais comme il faut lui donner une certaine longueur et, qu'en général, il sera fait en matériaux tout-venant peu coûteux, il y aura avantage à le faire le plus volumineux possible. La mise en place de ce noyau se fait par jets comme pour tous les autres matériaux. Sous l'action du courant, ces matériaux prennent successivement les formes des trois premières configurations.

La fig. 11 montre deux formes de noyaux de protection : un noyau simple pour les lits peu

(1) Houille Blanche, n° 2, Mars 1946.

affouillables, et un noyau à plusieurs couches pour les lits à grains très fins par rapport aux blocs normaux du massif.

Affouillements à l'aval (voir fig. 12). — Nous avons toujours observé que l'écoulement à la restitution aval s'effectuait par un courant de surface et un rouleau de fond. Cette forme d'écoulement produit sur le lit affouillable un creusement en cuvette allongé. Le contre-courant du rouleau tend à remblayer le pied du massif, tandis que le creusement maximum se situe dans la zone de partage du jet sur le fond. Le massif se protège donc de lui-même contre l'affouillement aval. Bien que l'affouillement en cuvette ne soit, en général, pas très fort, la pro-

Fig. 12. — MASSIF SUR UN LIT ALLUVIONNAIRE AFFOUILLE

gression du massif vers l'aval peut, malgré la tendance au remblaiement du pied du massif, provoquer un abaissement du lit et, ainsi, faire augmenter le volume nécessaire à la construction du massif. Un noyau de protection en blocs intermédiaires ou tout-venant, ayant une longueur vers l'aval un peu inférieure à la longueur qu'aura le massif terminé, permettra d'éviter cet inconvénient. L'économie de matériaux ainsi réalisée sera égale à la différence entre les quantités d'alluvions entraînées à l'aval pendant la construction du massif, lorsque le noyau est court ou long.

Affouillements latéraux à l'aval du massif. — D'une manière générale, lorsque le massif n'est pas encadré par des berges régulières, alignées et insubmersibles, il se produit des affouillements supplémentaires.

Nous ne décrirons pas la diversité des cas qui peuvent se présenter et qui sont courants en hydraulique (barrages mobiles en rivières, par exemple); nous nous contenterons d'indiquer qu'il faudra, dans la mesure du possible, soit encadrer la zone de formation du massif par des berges régulières artificielles s'il y a lieu, soit, par une étude préalable, trouver des moyens appropriés de protection.

II. — Formation et réduction des brèches

Le principe de la construction exige que la crête déversante reste toujours sensiblement horizontale. Si, pour une raison quelconque, une partie de la crête est plus basse (brèches) le débit passant sur cette partie est plus grand et le profil d'équilibre correspondant à l'aval est différent.

Avant de voir comment on peut éviter ou réduire les brèches nous allons décrire les phénomènes successifs qui s'y rapportent. Dans la formation d'une brèche, on peut distinguer deux phases très nettes : l'amorce de la brèche et l'évolution de la brèche. La première, qui est la formation initiale d'un point bas, a des causes très diverses que nous allons rapidement énumérer :

— *Inégale répartition du lancement des blocs*, ou trop forte quantité de blocs jetés à la fois.

— *Affaissement irrégulier* du massif par tassement ou écrasement des matériaux du massif ou du lit, par affouillement du lit sous le massif.

— *Éboulement sur le talus amont*. Ce talus qui s'engraisse à mesure que le barrage s'élève, se forme par de petits éboulements brusques et successifs, particulièrement pendant la quatrième configuration. Ces éboulements se répètent souvent jusqu'à la crête d'une manière assez importante pour en changer l'altitude notablement.

— *Emploi de matériaux tout-venant*. Le triage opéré par l'eau peut être accidentellement très irrégulier.

— *Irrégularité des berges*. Elle provoque localement des creusements sur le massif lui-même, pouvant avoir une répercussion sur la stabilité de la crête.

— *Passage d'un débit plus fort* (crues). Une augmentation de débit produit un remaniement du massif qui n'est pas toujours régulier, car l'arrangement des blocs peut donner des zones qui résistent, à des degrés différents, à leurs destructions par le courant.

Toutes ces causes peuvent se combiner entre elles pour provoquer des brèches.

Evolution d'une brèche. — La brèche ainsi amorcée peut évoluer ou rester stable. Elle évoluera si le profil du massif, au droit de la brèche, est insuffisant pour assurer l'équilibre des pierres avec les nouvelles conditions hydrauliques produites par le point bas de la crête.

Les cas sont extrêmement nombreux et complexes; aussi allons nous tout d'abord décrire des phénomènes simples.

Pour des niveaux amont et aval donnés il peut exister 1, 2 ou 3 profils de massif ayant un volume donné et correspondant à l'état d'équilibre limite des pierres. L'amorce et l'évolution des brèches sera donc, et d'une manière générale, le passage à volume constant d'un profil d'équilibre haut à un profil d'équilibre plus bas.

Prenons un exemple simple :

Soit deux bassins séparés par une digue en enrochement.

On suppose que les niveaux dans les bassins sont constants, quelles que soient les ouvertures faites dans la digue. On peut facilement tracer la courbe qui donne pour l'état d'équilibre des pierres, la hauteur H_2 du massif en fonction de son volume (voir fig. 13). On constate qu'à chaque volume correspond zéro, une ou deux hauteurs de massif déversant et zéro ou une hauteur de massif émergeant.

Si l'on se donne un massif émergeant, il y a dans le cas de la fig. 13 deux profils déversants qui ont même volume. On conçoit alors que si,

Fig. 13. — EVOLUTION DES BRÈCHES DANS UN MASSIF DE VOLUME DONNÉ

pour une raison quelconque, une brèche est amorcée dans la digue, le massif évoluera vers l'un ou l'autre des profils suivant la profondeur de l'amorce de la brèche. Le profil le plus bas

équivalait, d'ailleurs, à la destruction quasi totale de la digue. Le plus souvent la brèche n'évolue pas ou peu tant que la crête est au-dessus du profil d'équilibre haut, tandis qu'elle évolue avec une très grande rapidité lorsque la crête s'abaisse au-dessous de ce profil. La figure 13 montre l'influence du volume sur les risques d'évolution de brèche. La zone intérieure de la courbe est une zone d'instabilité, où les brèches évoluent avec rapidité tandis que la partie extérieure est une zone stable ou plus exactement dans laquelle tout écrêtement du massif ne produira qu'un léger remaniement du profil à l'aval, sans répercussion sur la crête du massif. Si l'on veut éviter tout risque d'évolution, on donnera à la digue un volume supérieur au maximum de la courbe. Pour réduire ce maximum, il suffit d'employer des matériaux plus gros.

Dans les cas plus complexes de massif de coupure avec galeries de dérivations, les risques d'évolutions de brèches se présenteront, en général, de la manière suivante :

Pendant la première, la deuxième configuration et le début de la troisième configuration il n'y aura aucun risque d'évolution de brèches. Ce risque qui débutera vers le milieu de la troisième configuration ira en s'accroissant jusqu'à la quatrième configuration. Le massif normal représentera le profil d'équilibre haut tandis que le profil bas sera celui vers lequel évolueront les brèches. Pendant la quatrième configuration, le profil est, en quelque sorte, surabondant ; il y a donc deux autres profils d'équilibre limite ayant même volume, un profil haut et un profil bas. Les brèches n'évoluent franchement et rapidement que si l'écrêtement descend au-dessous de la hauteur du profil haut. Ce fait est assez favorable car il donne une certaine marge dans la régularité de l'élévation du barrage. Il est, en effet, assez difficile d'assurer l'horizontalité de la crête pendant cette phase, en raison de sa forte élévation à chaque jet de pierres. Il suffit donc que les points bas de la crête ne descendent pas au-dessous du profil d'équilibre limite haut.

Notons, encore, qu'un facteur important dans la non évolution des brèches réside dans la différence de valeurs entre la vitesse limite de construction des massifs et celle de destruction.

Le calcul des profils d'évolution des brèches en fonction du volume des pierres jetées est assez complexe, car les conditions hydrauliques de niveaux, débits, etc..., changent avec le creusement et l'élargissement de la brèche. On peut, néanmoins, dans certains cas, effectuer ces calculs. On peut, également, calculer le volume nécessaire à la réduction de la brèche.

Réduction des brèches. — La première idée est de jeter des pierres dans la brèche. Dans l'exemple précédent, par exemple, une brèche qui a évolué jusqu'à sa position basse nécessite, pour être réduite, un volume de matériaux donné par le maximum de la courbe (fig. 13).

Cet exemple est un cas extrême, car, en général, l'évolution de la brèche amènera un abaissement du niveau amont, d'où une réduction du volume maximum.

En général la brèche ne sera que locale et, suivant la forme du massif, ne s'étendra pas beaucoup en largeur. On peut avoir intérêt, pour réduire la brèche, à augmenter sa largeur, le volume total nécessaire pouvant alors être plus faible ; des calculs d'après la théorie indiquent l'intérêt de procéder à cet élargissement.

Dans certains cas on pourra réduire la brèche sans avoir un trop fort allongement à l'aval en utilisant des blocs plus gros ou des « retards » dont nous verrons plus spécialement l'emploi au chapitre III.

D'une manière générale, l'évolution d'une brèche d'abord rapide, se fait ensuite de plus en plus lentement lorsque le massif approche de sa position basse d'équilibre ; si on dispose de moyens suffisants, on peut lutter de vitesse contre cette évolution par un jet intense de blocs ; on arrive ainsi à réduire le volume nécessaire à la réduction de la brèche, mais cette pratique nécessite que les jets de blocs soient très réguliers afin de ne pas créer d'accumulation momentanément plus stable, qui risque ensuite de se détruire et de reformer la brèche.

Précautions pour éviter les brèches. — Il suffit d'éviter de les amorcer. Pour cela il faut :

- contrôler en permanence la régularité de montée et d'allongement du massif.

- avoir fait le nécessaire pour supprimer l'affouillement du lit sous le massif.

- avoir régularisé les berges.

- utiliser vers la fin de la troisième configuration et au cours de la quatrième, des blocs de granulométrie constante, et si possible peu étendue.

- éviter les jets concentrés trop localisés.

- pendant une crue qui érode le massif, contrôler l'érosion de la crête et jeter isolément quelques gros blocs afin de désagréger les zones qui résistent à l'érosion.

Etanchement du massif

L'étanchement du massif s'obtient assez facilement en jetant des matériaux de plus en plus fins sur le talus amont du massif.

La grosseur des grains de chaque couche doit être, en moyenne, supérieure aux vides laissés par les grains de la couche inférieure, afin d'éviter leur entraînement dans l'intérieur même du massif, par le courant d'infiltration. Cette pénétration des matériaux peut être éventuellement recherchée si l'on veut étancher dans la masse.

En principe, avec quatre couches de matériaux, on doit arriver à bien étancher le massif ; leur granulométrie sera sensiblement la suivante :

Première couche : diamètre des grains compris entre $0,3^D$ et $0,15^D$ (D étant le diamètre des blocs du talus amont du massif initial).

Deuxième couche : tout-venant s'étendant depuis $0,5^D$ jusqu'à de très petits graviers.

Troisième couche : mélange de sable grossier et fin.

Quatrième couche : argile.

Les couches sont constituées en jetant les matériaux au sommet du talus amont ; elles se forment par éboulement sous l'eau. Il faut remarquer qu'avant étanchement le talus est incliné à 1/1 en raison de la poussée due au courant d'infiltration, mais à mesure que l'étanchéité se forme les couches tendront à prendre un fruit plus fort, celui du talus d'équilibre sous l'eau calme des matériaux utilisés. L'épaisseur des couches va donc être plus grande à la base qu'au sommet, ce qui est assez favorable, mais nécessite l'emploi de plus de matériaux qu'on peut le penser à priori.

Emploi des matériaux tout-venant. — Examinons ce qui se passe si, au lieu d'utiliser des blocs triés de même grosseur, on utilise un mélange de blocs de grosseurs très variables, mais de granulométrie constante. Le massif passe par toutes les configurations décrites précédemment, mais il se produit un triage de blocs dont nous allons examiner les conséquences.

Les premières pierres jetées se trient par déviation au cours de leur chute dans l'eau (fig. 14). Les pierres atterrissent d'autant plus en aval que leur dimension est plus faible, l'influence de leur forme étant mise à part. Les pierres plus petites que les matériaux du lit alluvionnaire peuvent être entraînées définitivement.

On observe un certain temps cet effet de triage, puis lorsque la troisième configuration est nettement amorcée, apparaît un triage différent, déjà signalé dans notre précédente publication (1). On constate que les pierres, sous l'action du

(1) Houi

courant, ont tendance à se déposer de telle sorte que chacune s'appuie à l'aval sur une pierre plus grosse qu'elle. Ceci peut se comprendre assez facilement par l'importance de l'appui aval dans l'équilibre des pierres.

Dans le mélange de pierres que l'on jette et qui roulent sur le massif, ce sont les plus petites qui rencontrent le plus facilement un appui à leur échelle, elles se stabilisent donc les premiè-

Fig. 14. — TRIAGE ET RÉPARTITION DES MATÉRIAUX DURANT LA CONSTRUCTION DES MASSIFS EN TOUT-VENANT.

res. Dans le mélange restant qui poursuit sa route, ce sera encore les plus petites qui seront les plus favorisées dans cette recherche d'un appui et qui tendront encore à s'arrêter et s'éliminer des pierres en mouvement et il en est ainsi tant que la granulométrie des pierres en mouvement reste étendue.

Sous l'effet de ce triage les petites pierres se rencontreront à l'amont et les grosses à l'aval. Le résultat final qui tient compte de la granulométrie du mélange, de la variation de la vitesse d'équilibre des pierres en fonction de leur appui, de la différence de rugosité est traduit en moyenne par la répartition que donne la figure 14 c. La vitesse du courant qui s'établit sur le massif est intermédiaire entre celle qui correspond à l'équilibre des petites pierres seules et celle des pierres moyennes seules.

Les très grosses pierres étant les moins déviées pendant leur chute sous l'eau tombent en amont de la crête sur le talus amont. Les éléments fins qui ne sont pas entraînés par suspension se sont, en général, logés dans les interstices des plus gros, dès leur contact avec le massif. Les autres éléments compris entre les plus gros et les plus fins se classent en moyenne comme le représente la figure 14 c. Parmi ces derniers, les plus gros ont, en général roulés jusqu'au talus aval.

Ce triage est donc très défavorable à l'élévation du massif car les gros matériaux, qui pourraient raidir la pente de la zone à écoulement uniforme et ainsi élever le massif sans trop l'allonger, se placent dans des zones inactives qui ne servent qu'au remplissage. Les éléments les plus fins, au contraire, constituent la surface de la zone active, et s'arrangent de manière à rendre peu rugueuse cette surface qui, de ce fait, prend une pente très faible. Le massif, lorsque la granulométrie est très étendue, s'allonge beaucoup et s'élève peu.

Dans la pratique, il est difficile et coûteux de trier des enrochements ; aussi, en général, préférera-t-on employer du tout-venant, le volume nécessaire alors sera très grand. Mais nous verrons que des techniques spéciales permettent non seulement de réduire ces volumes, mais encore de renverser complètement l'effet de triage en donnant aux gros éléments le rôle actif, et aux petits éléments le rôle de remplissage et d'étanchéité. Nous n'insisterons donc pas sur l'emploi du tout-venant seul et décrirons plus complètement, dans un prochain numéro de la *Houille Blanche*, ces techniques particulières qui ont été imaginées lors de l'étude de la coupure du Rhône à Génissiat et dont une a été utilisée dans la réalité.

Influence de la largeur de la coupure sur le volume du massif. — Pour un massif de coupure avec galerie de dérivation le volume des matériaux en fonction de la largeur b du massif peut s'écrire approximativement toutes choses égales par ailleurs :

$$V = A b + B b^{1/3} + C b^{-1/3}$$

Il y a donc, pour le massif de coupure proprement dit, une largeur qui donne un volume minimum. Ceci est intéressant lorsque dans une rivière on a le choix de la largeur. Mais si l'emplacement est imposé on n'obtiendra pas, en général, de réduction du volume total des matériaux en construisant des digues latérales destinées à retrouver la largeur optimum de coupure. C'est par cette étude de l'influence de la largeur

6

9

7

10

8

11

Photos 6 à 11. — PHASES SUCCESSIVES DE LA CONSTRUCTION DANS UN ESTUAIRE A MARÉE D'UN BARRAGE EN ENROCHEMENT AVEC NOYAU CENTRAL D'ÉTANCHÉITÉ.

que l'on peut montrer l'avantage de la construction du massif suivant toute la largeur de la rivière au lieu de procéder par avancement de digues depuis les berges. La fermeture de la brèche nécessite alors un massif très volumineux qui à lui seul peut, dans certains cas, être plus important que celui nécessité par la méthode précédente. Néanmoins, pour des rivières très larges, on peut avoir intérêt à réduire à l'optimum la largeur de coupure afin de diminuer le volume des matériaux du massif de coupure proprement dit, car le coût de ces matériaux et de leur mise en œuvre est plus élevé que celui relatif aux digues latérales.

Considérations diverses

Nous terminerons ce chapitre en indiquant diverses considérations que l'on peut être amené à étudier en détail.

La rapidité de construction du massif peut avoir une certaine importance lorsque la retenue amont est grande, car le remplissage de la retenue à mesure que le massif s'élève diminue le débit qui déverse sur le massif, et cela d'autant plus que le massif s'élève plus vite.

Pour une cadence très rapide de lancement des pierres on peut donc réduire le volume du massif de coupure. Cette méthode ne tolère aucun ralentissement, car le massif pourrait être mis en équilibre instable. On peut limiter cette méthode de construction à la phase d'allongement maximum du massif et obtenir, ainsi, un raccourcissement notable.

Dans certains cas, il sera intéressant de cons-

truire simultanément plusieurs massifs distincts de coupure. Du point de vue hydraulique, cela revient approximativement à couper et séparer un massif unique en plusieurs parties. En première approximation, le volume total n'est augmenté que par celui des talus de soutien qui sont multipliés par le nombre de massifs et qui n'ont aucun effet hydraulique. Cette méthode qui peut être intéressante lorsqu'on doit faire dans une rivière deux batardeaux d'isolement du chantier, un à l'amont l'autre à l'aval, a été utilisée au chantier de Génissiat sur le Rhône.

On peut prévoir plusieurs lignes de lancement des pierres et obtenir une assez forte économie de volume en ne se servant, pour la quatrième configuration, que des lignes de lancement aval. On utilise ainsi beaucoup mieux la longueur qu'a pris le massif pendant sa phase d'allongement maximum et on évite l'engraissement du talus amont qui absorbe un volume important pendant la quatrième configuration, si l'on conserve la même ligne de lancement des blocs.

La détermination de la position des lignes de lancement sera fonction également de la déviation des pierres pendant leur chute sous l'eau.

Dans les estuaires à marées avec inversion des courants, les massifs de coupure seront doubles, un dans chaque sens. Il peut être intéressant, soit de croiser les lignes de lancement pour économiser sur les volumes, soit de les écarter pour permettre la mise en place d'un noyau central d'étanchéité, comme le montre la série de photos n° 6 à 11.

Chaque cas nécessite des études particulières dont un exemple, celui de la coupure du Rhône à Génissiat, sera donné dans un prochain numéro de la *Houille Blanche*.

LE BARRAGE CLATTERING SHAW

B. C. 8888

(Communiqué par le British Council)