

bois et les jonctions étanches seront à remplacer dans des délais assez longs. Dans ce but ou si on veut faire une revision de la chambre d'équilibre on arrêtera par un axe placé sous le sommet et manœuvré sur l'un des côtés le barrage dans sa position supérieure et l'on pourra vider la chambre ; le barrage restera dans sa position sous la pression entière du remous (fig. 18, 21 et 22). Pour changer les jonctions ou le revêtement du clapet d'amont, on posera une caisse sans fonds qui couvre la section que l'on désire renouveler et qui reposera avec des jonctions étanches sur la base en amont et les parties voisines du clapet. Les fig. 18, 21 et 22 montrent cette opération.

La figure 23 donne la vue d'aval du barrage hydraulique construit pour l'usine électrique de la ville de Bruck-sur-Mur, en Styrie. On voit à partir de la rive droite deux fractions de 22 m. de longueur chacune dont l'une est fermée, l'autre ouverte ; puis, après l'échelle à poissons, le bassin de flottage de 11 m. de longueur sur 1.90 m. de hauteur amont. La sortie du bassin est munie d'une table flottante percée qui détermine une bonne protection vis-à-vis de l'excavation du fond par l'eau déversée. A gauche du bassin de flottage on voit l'ouverture de purge fermée par 3 vannes ordinaires. Cette ouverture pourra également être



Fig 25. — Passage de la glace. Barrage de Bruck-s/-Mur.

fermée par un barrage en forme de toit de 9 m. de longueur sur 3.60 m. de hauteur actuellement en construction. La Mur ne charrie pas seulement beaucoup de graviers, mais aussi en hiver une immense quantité de glace. Avant sa modification le corps fixe du barrage était rehaussé par des clapets appuyés, et le bassin de flottage fermé par une vanne ordinaire. Il était très difficile d'ôter ces cloisons à temps, si la débacle de la glace se produisait rapidement, et le bassin d'eau en amont du barrage ainsi que le canal de mise en charge furent parfois comblés de glace à un tel point qu'on fut obligé souvent d'interrompre l'exploitation de l'usine. Aujourd'hui quand la débacle arrive, on abaisse un peu le barrage-toit et les glaçons passent comme on peut le voir sur la figure 24 où la fraction de gauche (par rapport à la direction du fleuve) a été ouverte. La figure 25 montre de près la même partie du barrage en action pendant que celle de droite est encore en construction.

Le système décrit est très approprié en tant que barrage fonctionnant sur les cours d'eau charriant de fortes quantités de glaces parce que les clapets se meuvent dans l'intérieur de la chambre d'équilibre pendant l'abaissement du barrage. La glace se forme à l'extérieur du barrage le long de l'axe d'amont et contre les murs latéraux pendant les grands

froids lorsque le barrage est fermé ordinairement ; elle n'empêche donc pas son fonctionnement comme c'est le cas dans les barrages à papillon où la glace se forme au-dessous du clapet. Aussi le barrage de Bruck a fonctionné d'une manière satisfaisante à une température de -25° et a évité l'interruption de l'exploitation de l'usine. Comme conséquence plusieurs autres barrages mobiles en forme de toit de dimensions considérables vont être construits dont un de 3.5 m. de remous sur 26 m. de longueur. Ce système conviendrait sans doute fort bien au régime des rivières de notre pays. Il est évident que les frais de construction du barrage en forme de toit sont relativement moins élevés pour une grande ouverture, les appareils de réglage étant presque les mêmes pour une ouverture large que pour une ouverture étroite. Il est intéressant de la comparer avec d'autres systèmes de barrages mobiles ; on sait que pour une vanne qui permet de fermer des ouvertures assez larges, la force de flexion, à laquelle elle doit résister est très grande, puisqu'elle augmente le carré de la portée, la vanne doit donc être de construction très solide. Pour le barrage hydraulique en forme de toit au contraire, les forces sont transmises aux fondations par les fermes disposées à courts intervalles. C'est pourquoi, malgré les doubles clapets, la quantité de matériaux employée n'est pas plus grande pour un barrage hydraulique que pour un barrage à vannes de grande portée. On économise ainsi les frais des treuils de levage, de la passerelle de service et au moins une partie de ceux relatifs à la construction de la muraille des piles qui ne sont que d'une épaisseur modeste. Par contre les fondations d'un barrage hydraulique sont plus larges que celles d'un barrage à vannes.

UN INGÉNIEUR.

LES BÉTONS LÉGERS ET LES RECORDS DE HAUTEUR DES BARRAGES

Le présent article est le développement partiel d'une note que nous avons présentée le 16 février à l'Académie des Sciences. La limitation imposée aux auteurs dans l'espace occupé dans les comptes rendus de l'Académie n'a pas permis de détailler, dans cette note même, les calculs relatifs au déplacement du record de hauteur des murs de réservoir : on trouvera ci-après des explications complètes qu'il était intéressant de fournir sur ce résultat qui, à priori, est paradoxal.

Dans les constructions en maçonnerie ou en béton, le poids mort est presque toujours une cause de fatigue, donc de dépense, que l'on a depuis longtemps combattue, d'abord par l'évidement des massifs, puis indirectement par l'emploi de liants plus résistants (remplacement de la chaux par le ciment) ; plus tard, indirectement encore, par l'introduction d'armatures métalliques ; enfin, directement, par le choix de pierres légères. Ce dernier moyen, le plus simple de tous, n'est appliqué systématiquement que depuis peu d'années et sur une échelle encore restreinte : pour le susciter, il n'a fallu rien moins que la crise de la main-d'œuvre qui, avantageant l'emploi des pièces moulées d'avance et mises en place par des grues, fait naître, de toute réduction des masses à manutentionner, une économie de temps et d'argent.

Tel est le motif des recherches expérimentales que j'ai entreprises dès 1909, avec le Laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, sur les bétons de mâchefer. Elles ont établi,

notamment, que, pour une même teneur en ciment après contraction, le béton de mâchefer est généralement un peu plus résistant que le béton de gravier, quelquefois beaucoup plus, quelquefois un peu moins ; qu'il pèse de 30 à 40 % de moins ; que le rapport de la résistance au poids est maximum pour un volume de sable quatre ou cinq fois moindre que celui du mâchefer.

Des expériences dues notamment à Mesnager ont établi qu'on ne doit nullement redouter pour les armatures une attaque chimique du soufre généralement contenu dans le mâchefer. Au surplus j'ai institué, à ce sujet, une épreuve qui n'est autre que l'essai à chaud d'Henri Le Chatelier opéré sur un mélange de ciment et de mâchefer très finement pulvérisé. Mais on conçoit que le remplacement du soufre au contact du fer serait encore plus rapidement limité que celui du chlore au contact du ciment dans les mortiers confectionnés à l'eau de mer, qui ne s'allèrent jamais pour ce motif.

A la suite de ces essais, j'ai construit en béton de mâchefer et sable les parties principales de deux ouvrages importants du réseau d'Etat, savoir : le pont sous la station d'Asnières, près Paris, et l'appontement dit de Lestonat, dans le port de Bordeaux. Je termine actuellement dans l'arsenal de Lorient un grand appontement en béton de mâchefer comportant des pilotis de 20 mètres de longueur et 0 m. 40 d'équarrissage. Le Ministère des Travaux publics vient d'approuver un projet de transformation du pont dit de Verdun, à Angers, avec emploi exclusif du béton de mâchefer. Je fais exécuter en béton léger, où le gravier est remplacé par de la pouzzolane, des wagons-citernes et des bateaux. Mais cette dernière application se développe surtout aux Etats-Unis, grâce à l'emploi de briques poreuses ne pesant que le tiers de l'eau et fournissant un béton de résistance normale sous le poids de 1,3.

On parvient, en somme, à faire des bétons moitié moins lourds, à résistance égale, que ceux de gravier.

Leur étude théorique comporte deux parties : 1° calcul du rendement de chaque type d'ouvrage (rapport de sa résistance à son prix) en fonction du poids spécifique, de la résistance et du prix du béton ; 2° calcul du maximum de hardiesse que permet d'atteindre un béton défini par sa résistance r et son poids spécifique p . C'est un aperçu de cette seconde étude que je désire donner ici :

Le genre d'ouvrage le plus instructif à cet égard est le mur de réservoir, d'abord, parce qu'avant la crise économique, la densité de la maçonnerie y était un élément favorable au rendement, puis parce qu'au premier abord il peut sembler que la pesanteur est la seule force à opposer à la poussée de l'eau (présomption erronée en ce qu'elle fait abstraction de la résistance limitée du mur à la compression). Pour mieux éclairer un sujet aussi nouveau, je traiterai trois cas, savoir : le mur non armé calculé suivant le principe de Delocre (loi de Navier modifiée en supposant nulle la résistance de la maçonnerie à l'extension), puis le mur non armé calculé d'après la règle introduite par Maurice Lévy pour éviter les sous-pressions ; enfin, le mur moderne tel que je le conçois, c'est-à-dire pourvu de mon armature-surface.

Dans les trois cas, je supposerai le profil triangulaire avec parement amont vertical, approximation usuelle légitimée par le fait que telle est la forme dont se rapprochent de plus en plus les grands barrages construits dans ces dernières années. Enfin, d'accord avec Résal, j'admettrai la même limite r pour les pressions aval et amont, en charge : r_1 et r_2 , mais une limite plus élevée, soit $\frac{3}{2}r$, pour la pression

amont à vide r_3 , dont l'exagération ne créerait pas un risque aussi grave.

Type n° 1 : Profil triangulaire non armé, dimensionné d'après Delocre. — La résultante des forces extérieures passant, en charge, hors du tiers central, la section de largeur b , à la profondeur h (fig. 1), ne réagit que sur la longueur u , entre la résultante et le parement aval. On a ainsi, en charge :

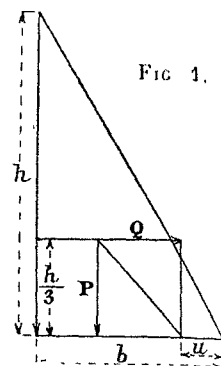
$$P = \frac{pbh}{2}$$

$$Q = \frac{h^2}{2}$$

$$u = \frac{2}{3}b \quad \frac{h}{3} \frac{Q}{P} = \frac{2pb^2 - h^2}{3pb}$$

$$r_1 = \frac{2P}{3a} = \frac{p^2b^2h}{2pb^2 - h^2}$$

$$r_2 = 0,$$



Or, r , croît avec b sans pouvoir atteindre $\frac{ph}{2}$. Donc, inversement, pour une limite r imposée à la pression, la hauteur h ne peut dépasser $\frac{2r}{p}$.

A vide,
$$r^2 = \frac{2P}{b} = ph,$$

d'où, pour h , une seconde limite supérieure, moindre que la précédente et égale à $\frac{3r}{2p}$.

Tel est donc le véritable record de hauteur. Il est inversement proportionnel à la densité du mur, de sorte qu'une réduction de moitié sur p permet de doubler le record actuel.

Type n° 2 : Profil triangulaire non armé, dimensionné d'après Maurice Lévy. — Cet ingénieur a préconisé, pour éviter les sous-pressions, le maintien de la pression verticale, en chaque point du parement amont, à une valeur au moins égale à la charge d'eau. Dans ce cas, il n'y a en aucun point du mur une tension verticale ; la résultante (P, Q) passe donc dans le tiers central de b , d'où, en charge :

$$\left\{ \begin{aligned} r_1 &= \frac{2P}{b} \left(2 - \frac{3u}{b} \right) = \frac{h^2}{b^2}, \\ r_2 &= \frac{2P}{b} \left(\frac{3u}{b} - 1 \right) = ph - \frac{h^2}{b^2}. \end{aligned} \right.$$

On satisfait strictement à la règle de Maurice Lévy en posant

$$\left\{ \begin{aligned} r_2 &= h < r, \\ r_1 &= (p - 1)h < r, \end{aligned} \right.$$

d'où deux limites de hauteur, savoir r et $\frac{r}{p-1}$.

La considération de réservoir vide fournit, comme dans le premier cas, une troisième limite $\frac{3r}{4p}$.

Pour $p = 2,4$, la limite la plus basse est la troisième qui devient $\frac{r}{1,6}$. Pour $p = 1,2$, c'est la première. Le véritable record est donc multiplié par 1,6, et comme il est actuellement d'environ 100 mètres, on peut le porter à 160 sans changer la composition usuelle du massif au point de vue du liant.

Type n° 3 : Mur armé en surface à l'amont. — Le point de

vue de Delocre a été abandonné pour celui de Maurice Lévy par la crainte de sous-pressions d'eau infiltrée capables de créer dans le massif, des tensions verticales.

Malheureusement on ne peut empêcher par ce moyen, ni par aucun autre, sauf l'étanchement complet du mur, la naissance de tensions non verticales, au moins

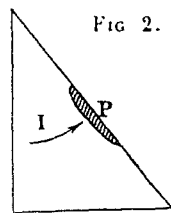


FIG 2. aussi dangereuses. En effet, si l'eau infiltrée suivant I (fig. 2) rencontre au parement aval (où la pression est nulle) une plaque de maçonnerie P un peu moins perméable, elle en provoquera le décollement par voie de tension.

Ainsi la précaution suggérée par Maurice Lévy est insuffisante si, le mur n'est pas rendu parfaitement étanche ; or, s'il l'est, cette précaution devient inutile. Il faut donc conclure à la nécessité absolue d'un revêtement imperméable à l'amont, moyennant lequel on n'aura pas à se préoccuper des sous-pressions.

On sait aujourd'hui que le plus sûr revêtement imperméable est la tôle d'acier. En lui faisant jouer, par surcroît, le rôle d'armature, on réalise une combinaison éminemment avantageuse. C'est pourquoi j'ajoute aux calculs qui précèdent celui d'un mur armé à l'amont par une tôle d'acier continue.

Du fait de son armature, le mur en charge peut supporter sans risque une tension dont la valeur dans le métal sera appelée r' . Nommant, comme d'usage, m le coefficient d'équivalence et y la distance de l'axe neutre au parement comprimé (aval), la loi de Navier s'écrit :

$$r'y = mr(b - y) ;$$

puis l'équilibre des forces en projection verticale donne, s étant l'épaisseur de la tôle,

$$pbh = ry - 2 r'e.$$

Eliminant y , il vient

$$mbr^2 = (r' + mr)(2r'e + pbh).$$

D'autre part, si n est le rapport des prix par mètre cube de l'acier et du béton en place, la condition

$$db + nde = 0$$

exprime que le rendement du profil est optimum. En la combinant avec la précédente différentiée, on élimine $\frac{de}{db}$ et l'on obtient

$$ph = \frac{r'}{n} + \frac{mr^2}{r' + mr}.$$

Comme cette équation fournit immédiatement h en fonction des données p, n, m, r, r' , il est inutile de recourir à l'équation des moments qui ne serait utile que si nous voulions calculer aussi les dimensions b, e , ce qui ne nous est pas nécessaire pour aujourd'hui.

La dernière formule ci-dessus montre que pour notre troisième type de mur (comme pour le premier) le maximum de hauteur réalisable varie exactement en raison inverse de la densité. Si donc p est réduit de moitié, h peut être doublé. Il faut bien entendre que le record réalisable avec un béton lourd, record susceptible de doublement, est ici bien supérieur à 100 mètres, puisqu'il suppose l'emploi d'une armature et même d'un mode d'armature détenant lui-même le record de la puissance. Je reviendrai ultérieurement sur ce point en traitant, dans un prochain article, la question des rendements, absolument distincte de celle des records.

Ici se place une remarque très importante. Si l'on projette de parti pris un barrage non armé et non absolument étanche, il est évident qu'on ne peut en abaisser la densité jusqu'à celle de l'eau sans provoquer le renversement du mur (vers l'aval pour le type n° 1, vers l'amont pour le type n° 2) par l'effet des sous-pressions.

Mais si l'on se résout à l'étanchement absolu dont la nécessité a déjà été constatée plus haut, rien n'empêcherait, même pour un barrage non armé, d'abaisser la densité au-dessous de celle de l'eau, pourvu que l'on satisfasse aux trois conditions

$$0 < r_2 < r, \text{ et } r_3 < r.$$

Avec le type n° 1, d'après les formules établies ci-dessous pour ce cas, ces trois conditions se réduisent aux deux suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} h \leq \frac{3r}{p}, \\ b > \frac{h}{\sqrt{2p}}. \end{array} \right.$$

La hauteur réalisable continue donc à croître indéfiniment à mesure que la densité tend vers zéro, sous la seule réserve de donner à la base une largeur suffisante qui croît d'ailleurs moins rapidement que la hauteur.

Avec le type n° 2, les conditions à remplir se ramènent, d'après les formules établies pour ce cas, à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{r}{p} < h \leq \frac{3r}{2p} \\ b \geq h\sqrt{\frac{h}{p}} \end{array} \right.$$

c'est-à-dire que la hauteur a non seulement une limite supérieure croissant indéfiniment quand p tend vers zéro, mais en outre une limite inférieure égale aux deux tiers de l'autre, et que la densité peut être réduite autant qu'on le voudra, sous la seule réserve de donner à la base une largeur minimum indépendante de la densité et croissant plus rapidement que la hauteur.

Avec le profil n° 3, il est évident, *a priori*, qu'on pourrait réduire la densité du béton même jusqu'à zéro sans avoir à rendre démesurée la largeur de base, et que la hauteur limite croît indéfiniment quand p tend vers zéro. C'est donc surtout dans le cas du mur armé que l'allègement à outrance peut présenter de grands avantages.

Ces aperçus sur la possibilité d'un abaissement nouveau et considérable de la densité des constructions ne sont pas, comme on pourrait le craindre, du domaine de la fantaisie. Je me propose d'expliquer prochainement comment j'y suis parvenu en constituant les grands ouvrages d'art au moyen d'une maçonnerie de blocs creux en béton armé, système qui, plus exactement peut-être qu'aucun autre, répond aux exigences économiques du présent et de l'avenir.

Sans anticiper sur des progrès non encore réalisés, les exemples étudiés ci-dessus montrent que les bétons légers, tels qu'on les obtient couramment aujourd'hui, mettent à la disposition des constructeurs un surcroît de puissance qui pour certaines catégories d'ouvrages — et non les moindres — peut atteindre des taux inattendus et faire espérer des applications grandioses.

Charles RABUT,
Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite,
Ingénieur consultant.