

“ Les barrages en maçonnerie à gravité. ”

Le camarade CAMPUS déclare qu'il a accepté avec empressement la demande qui lui a été faite par le Président de la Section de Liège de faire une causerie préparatoire à la visite du barrage en construction dans la vallée de la Warche près de Malmédy, parce que l'occasion était propice de nouer des liens entre l'A. I. Lg. et la nouvelle section du Génie Civil de l'Université de Liège. Il remercie le Président et le Comité de la bienveillance et l'auditoire de l'intérêt qu'ils témoignent à la cadette des sections de la Faculté technique, et il demande que l'A. I. Lg. continue à lui accorder l'appui indispensable pour la faire connaître et progresser. Il espère que la nouvelle section contribuera à l'influence et au développement de l'A. I. Lg.

Après avoir engagé les membres à participer nombreux à l'intéressante visite projetée, il s'excuse de devoir limiter son sujet à un élément de la question des barrages de réservoir, dont les aspects sont si multiples qu'il serait téméraire d'essayer de les aborder tous en une courte causerie. Il rappelle que le camarade GUILLAUME a évoqué certains points dans une communication précédente et que le camarade HANOCQ, professeur à l'Université, parlera prochainement des turbines hydrauliques. Il se borne donc à parler des barrages de réservoir en maçonnerie à gravité, au type duquel appartient le mur de la Warche.

Après avoir énoncé succinctement la définition d'un barrage de réservoir et d'un barrage à gravité, il expose l'évolution des conceptions relatives à ces constructions depuis l'époque déjà lointaine de la construction des murs espagnols dont certains, qui existent encore, remontent au XIV^e siècle (Almansa); les murs les plus anciens, en maçonnerie de moellons liés au mortier de chaux, sont très massifs et présentent une section transversale presque rectangulaire, très épaisse.

On peut concevoir, à défaut de documents techniques originaux, que la stabilité de ces murs a été envisagée au point de vue externe. On a cherché à s'assurer contre le renversement autour de l'arête aval de la base ainsi que contre le glissement de cette base sur le sol. Pour obtenir un coefficient de sécurité suffisant avec la maçonnerie en question, l'épaisseur, constante du mur doit être environ 8/10 de la hauteur. En réalité, elle est supérieure parfois. (Val de l'Inferno.)

Ces murs contiennent des masses de maçonnerie non seulement superflues mais même défavorables pour la sécurité des murs de grande hauteur. C'est ce qui montre l'étude de l'équilibre interne, d'après les principes de la résistance des matériaux. Au début et dans le courant du siècle dernier, cette étude a fait l'objet de travaux importants de Sazilly, Delocre, Graeff (France), d'Intze (Aix-la-Chapelle), etc.

L'examen de l'importance des compressions dans des sections horizontales d'un mur rectangulaire vertical, en négligeant les effets latéraux (mur de grande longueur et sensiblement rectiligne), montre qu'elles vont croissant du sommet à la base.

La première condition élémentaire de sécurité adoptée a été de limiter le taux de compression maximum sur l'assise horizontale de fondation.

On constate que les murs rectangulaires ont une limite de hauteur (100 m. pour de la maçonnerie du poids de 2300 kg./m³ et une résistance de 23 kg./cm² du sol de fondation), que cette limite ne peut être atteinte avec une épaisseur finie et que l'épaisseur de sécurité croît rapidement lorsque la hauteur augmente (courbe semi-cubique).

Dans les conditions indiquées de densité et de résistance, qui seront conservées dans la suite, un mur de 50 m. de hauteur doit avoir 33 m. de largeur (section 1650 m²). La compression maximum en charge à l'aval est 23 kg./cm², la compression à vide est uniforme et égale à 11,5 kg./cm² sur la base.

Il est apparent qu'il y a intérêt à enlever de la matière à la partie aval du sommet du mur, c'est ce qui montre l'examen sommaire d'un mur triangulaire à parement amont vertical. Après avoir rapidement rappelé les lois de variation des tensions dans la section de base en fonction de la situation, par rapport au centre de gravité et de la région centrale, de la résultante des forces agissant au-dessus de cette section,

le camarade CAMPUS montre qu'il est possible de déterminer une section triangulaire telle que la tension maximum à vide à l'amont soit égale à la tension maximum en charge à l'aval. Pour 50 m. de hauteur, la base doit mesurer 33 m., la section n'est que de 825 m² (moitié de celle du mur rectangulaire), et les tensions maxima ne dépassent *en aucun cas* 11,5 kg./cm² dans les sections horizontales.

L'avantage est flagrant, mais on a voulu faire mieux encore. On constate que dans le mur triangulaire, la pression dans la maçonnerie décroît continuellement de la base vers le sommet. De là l'idée de construire des murs autant que possible d'égale résistance, en vue de réduire encore le cube de maçonnerie.

Avant de décrire la forme de ces murs, le conférencier rappelle la définition de la ligne des pressions et expose une condition de sécurité nouvelle relative à l'interdiction d'extensions dans les sections horizontales. Il justifie ce point en montrant le danger pour la stabilité du mur des sous-pressions produites par introduction d'eau dans une fissure horizontale du parement amont. D'après l'exposé qui précède, la condition nécessaire et suffisante pour éviter les extensions est que la ligne des pressions reste dans l'intérieur de la région centrale du mur sur toute sa hauteur.

Sur la base de ces éléments, le camarade CAMPUS expose succinctement la conception des murs d'égale résistance. Ils se distinguent des murs triangulaires par des parements courbes concaves, dont l'inclinaison moyenne est analogue à celle des murs à parements plans. Il en résulte donc que les inclinaisons à la base du mur, notamment à l'aval, sont beaucoup plus grandes. La réduction de section est faible et nullement comparable au bénéfice que réalise la section triangulaire par rapport à la section rectangulaire.

Des accidents se sont produits, notamment la catastrophe du barrage de Bouzey (France) survenue le 27 avril 1895, et d'autres. Ces murs n'appartenaient pas d'une manière caractérisée au type d'égale résistance, mais les conclusions de l'étude des causes de rupture ont montré le danger des murs d'égale résistance.

L'illustre ingénieur français Maurice Lévy, professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et Membre de l'Institut, a montré que les anciennes conditions de sécurité étaient insuffisantes. En se basant sur la théorie de l'élasticité des corps isotropes et l'ellipsoïde de Lamé, M. Lévy a montré que les compressions dans les sections horizontales ne sont pas les plus grandes qui se produisent dans un massif contraint. Ce qu'il faut limiter, ce sont les compressions principales maxima. Près d'un parement libre, par exemple le parement aval, la compression principale maximum est parallèle au parement et agit sur des facettes matérielles perpendiculaires au parement. Ces compressions maxima au parement sont égales à la compression dans la section horizontale multipliée par un facteur rapidement croissant avec l'inclinaison du parement et qui est égal à 2 pour une inclinaison de 45°. Il en résulte que, par suite de la forte inclinaison, les compressions principales maxima sont très fortes à la base aval des murs d'égale résistance en charge et peuvent donner lieu à des amorces de rupture.

M. Lévy a montré aussi que l'ancienne condition relative à l'interdiction d'extension est aussi insuffisante pour éviter les sous-pressions. Par les propriétés inhérentes aux maçonneries, des fissures horizontales ou des pores peuvent exister en l'absence d'extensions dues à la contrainte extérieure. Pour rendre les infiltrations inévitables tout à fait inoffensives, il faut que la pression interne du massif soit supérieure à la pression hydrostatique. En appelant $\emptyset$ le rapport des deux, il faut $\emptyset > 1$ C'est la condition dite de M. Maurice Lévy.

Pour mettre à l'abri des infiltrations et sous-pressions existantes, M. Maurice Lévy a imaginé le mur de garde ou masque qui porte son nom. C'est un revêtement évidé en maçonnerie ou béton armé posé sur la face amont. Les eaux d'infiltration descendent dans les évidements et sont recueillies par un collecteur, qui règne sur toute la longueur de la base du masque, et sont évacuées vers l'aval par un aqueduc. Le parement amont du mur de barrage même est ainsi à l'abri du contact de

l'eau sous pression. C'est l'origine des dispositifs de drainage dont les murs de barrage ont été presque généralement pourvus dans la suite.

Les conceptions de M. Lévy ont subi une légère évolution par suite des progrès réalisés dans le choix de matériaux et leur mise en œuvre pour la construction des barrages.

L'emploi du béton pratiquement imperméable sous les fortes épaisseurs d'emploi et dont les fissurations sont superficielles, fait que l'on n'impose plus la condition $\emptyset = 1$, mais que l'on admet des valeurs inférieures, qui dépendent de la fondation et de la nature des matériaux du mur, ainsi que de sa hauteur. Pour le mur de la Warche, $\emptyset = \frac{2}{3}$ environ.

Les idées de M. Lévy relatives à la limitation des compressions principales maxima ont été confirmées pleinement par les études théoriques de M. Pigeaud, professeur à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, qui a établi la théorie élastique des barrages triangulaires. Cette méthode est aujourd'hui généralement en usage et les murs triangulaires sont rentrés en faveur presque exclusive. D'autre part, M. Mesnager, professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Membre de l'Institut, et ses collaborateurs ont étudié les tensions internes des barrages triangulaires par la photoélasticimétrie au moyen de modèles de verre. Les observations ont montré une concordance concluante avec les résultats de l'étude élastique, notamment au sujet du tracé des lignes isostatiques ou de propagation des compressions principales maxima. Ces lignes donnent une représentation très intuitive de la résistance du barrage, de même que les lignes de force et les lignes équipotentielles rendent sensibles les phénomènes électromagnétiques. Cette impression est renforcée notamment par la variation d'allure des lignes isostatiques d'après la sollicitation extérieure et les dimensions du mur.

Pour les murs non triangulaires, la théorie élastique est trop complexe et encore impraticable, mais la méthode de la résistance des matériaux complétée par les conditions de M. Lévy donne une approximation satisfaisante pour la sécurité.

On peut estimer que la conception des murs de barrage à gravité a presque atteint son stade définitif. On s'attache actuellement à étudier les effets dits accessoires, notamment les effets thermiques, le retrait, les efforts latéraux, etc. Ces questions demandent surtout une étude expérimentale, notamment de laboratoire. Déjà en vue de rendre ces effets inoffensifs, on ménage le plus souvent des joints de dilatation verticaux à la partie supérieure du mur ou sur toute sa hauteur, à des entredistances de 20 à 40 m. Ces joints sont reliés au système de drainage général, dont les parties essentielles sont généralement accessibles par des galeries.

L'étude des matériaux se fait maintenant avec un soin scientifique qui exige le concours des laboratoires. La mise en œuvre se fait par des moyens mécaniques perfectionnés.

Tous ces éléments ainsi que les dispositions annexes : prises d'eau, bonde de fond, déversoir, etc., apparaîtront mieux au cours de la visite qu'il ne serait possible de les décrire en une brève causerie.

Le camarade CAMPUS conclut de l'exemple des résultats féconds dus à l'action combinée et continue des hommes d'étude et des praticiens qu'il faut persévérer dans cette voie pour résoudre les multiples questions techniques dont la solution est encore imparfaite. Le Génie civil n'est pas dépourvu de caractère scientifique, au contraire. Il peut occuper de nombreux chercheurs, mais il faut des laboratoires pour progresser.

Quelques clichés sont ensuite projetés qui illustrent, par quelques types comparatifs, l'évolution exposée des conceptions au sujet des barrages, poids, ainsi que les résultats de l'étude élastique d'un mur triangulaire comparé au barrage de la Gileppe. D'autres reproduisent les plans principaux du barrage de la Warche, qui sont dus à la gracieuse obligeance de la Société d'électricité de la Région de Malmédy, concessionnaire du barrage.

Le camarade CAMPUS cite à propos de l'ouvrage les chiffres suivants :

Hauteur de retenue : 55 m.

Capacité du réservoir : 8.000.000 de mètres cubes.

Chute disponible : 150 mètres.

Puissance moyenne : 6750 CV.

Puissance installée : 15.000 CV.

Epaisseur du mur à la base : 38 mètres.

Longueur : 182 mètres. Rayon de courbure : 180 mètres.

Cube de maçonnerie : 50.000 mètres cubes.

Longueur de la conduite d'amenée : 5640 mètres.

Deux autres barrages sont en projet sur la Warche. Les trois usines réunies seront capables de produire 50.000.000 kwh., correspondant à 50.000 tonnes de charbon.

Une vive ovation salue la fin de l'exposé méthodique et lumineux du camarade CAMPUS. Le Président remercie chaleureusement ce dernier qui, avant de nous exposer les données générales du barrage de Malmédy, a su nous rappeler adroitement et clairement les notions théoriques que la plupart d'entre nous ont perdues de vue.