

ZWEITE TAGUNG - SECOND MEETING - DEUXIÈME RÉUNION
STOCKHOLM 7—9. VI. 1948

CAMPUS, F., Directeur du Laboratoire d'essais d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège.

Deux études de dispositions destinées à prévenir ou réduire l'érosion en aval des barrages.

Ces deux études ont été effectuées au moyen d'essais sur modèles en 1942 et 1943. Très différentes par l'importance et la nature des ouvrages auxquelles elles se rapportent, elles ont donné lieu à l'examen de dispositions assez originales pour justifier cette communication.

1) Un barrage mobile à six pertuis de 27 m d'ouverture chacun, obturés par des vannes levantes métalliques, a été construit dans la Meuse en 1930. La chute maximum est de 5 m. Les vannes sont couronnées de hausses pivotantes établies pour pouvoir assurer l'écoulement d'un débit minimum de 400 m³/sec, débit caractéristique de 9 mois.

Selon le modèle, le débit maximum écoulé par déversement superficiel, sans soulèvement des vannes, serait de 560 m³/sec; la chute par rapport à la retenue normale étant alors de 4 m. Pour les débits supérieurs, l'écoulement se produit par le fond, sous les vannes soulevées de la hauteur nécessaire. Elles peuvent être retirées complètement hors de l'eau pour les débits de crue maximum, de l'ordre de 2650 m³/sec.

Le radier et les protections d'aval ont été construits de nombreuses années auparavant, pour un autre type de bouchure mobile et une moindre chute. A l'aval des piles, le radier massif, d'environ 40 m de longueur, comportait comme dispositifs d'amortissement douze seuils en saillie de 0,35 m et de 0,30 m de largeur, outre un léger refouillement de 0,50 m de profondeur, qui semble sans rapports avec l'ouvrage définitif (fig. 1).

Lors des hostilités de 1940, le pont édifié sur les piles à l'amont du barrage fut détruit et, à l'occasion des travaux de reconstruction du pont et de réparation des dégradations correspondantes au barrage, on

COUPE LONGITUDINALE DU RADIER EXISTANT

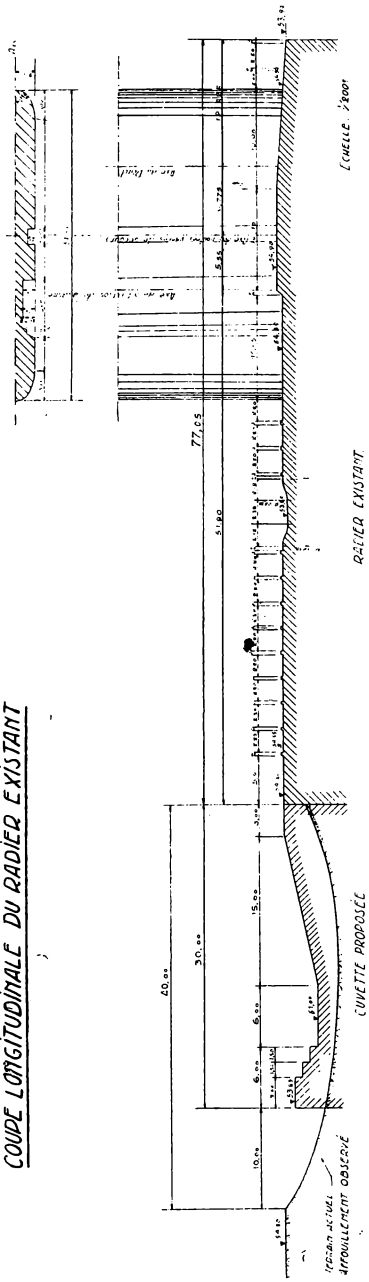


Fig. 1.

constata l'existence d'affouillements importants en aval du radier, sur une longueur d'environ 40 m et une profondeur maximum moyenne d'environ 4,50. La figure 2 reproduit la courbe granulométrique du gravier

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE.

A. GRAVIER de MEUSE.

B. GRAVIER à l'échelle du modèle $\frac{1}{20}$.

C. GRAVIER employé pour l'essai.

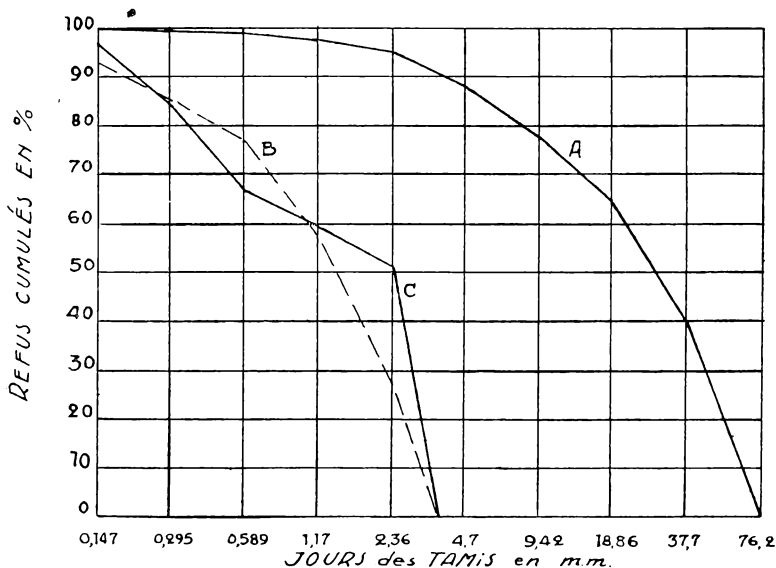


Fig. 2.

du fond du lit en aval, déterminé d'après un échantillon de 50 kgs remis au laboratoire, que nous avons admis comme caractéristique.

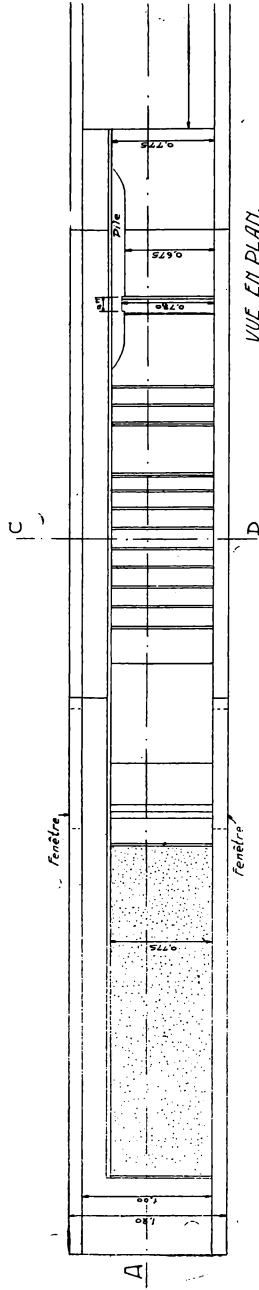
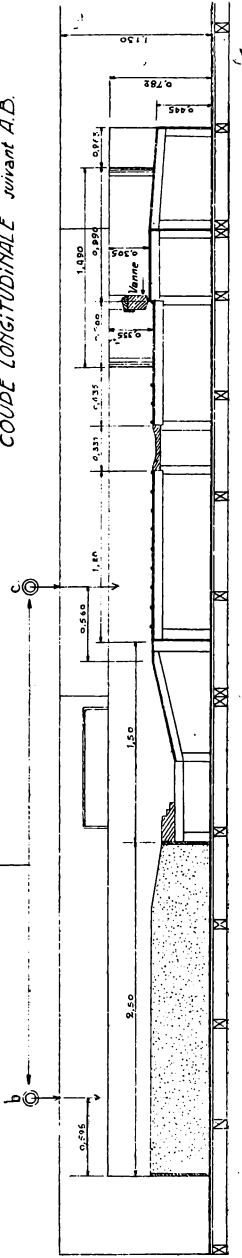
D'importants batardeaux ont permis d'isoler successivement les pertuis et de se rendre compte de l'étendue et de la profondeur des affouillements d'aval, qui avaient provoqué des excavations jusque sous l'extrémité aval du radier.

PLAN du MODÈLE.

$\frac{1}{300}$ du modèle
ÉCHELLE $\frac{1}{2000}$ de la réalité

COUDE LONGITUDINALE suivant A.D.

Limimètres.



VUE EN PLAN.

Fig. 3.

Pendant l'exécution de ces travaux, d'entrepreneur qui en était chargé, d'accord avec l'Administration des Ponts et Chaussées, nous a demandé, en 1942, d'examiner d'une manière urgente, par des essais sommaires sur modèles, l'opportunité d'établir en aval du radier existant un avant-radier, profilé en cuvette d'amortissement, en vue de prévenir les affouillements ultérieurs. (Fig. 1.)

Nous avons exécuté dans un canal en bois revêtu de zinc, existant au laboratoire, un modèle de demi-pertuis du barrage, à l'échelle de 1/20e. La figure 3 reproduit la disposition du modèle, sans les dispositifs d'alimentation. Ceux-ci consistaient en une conduite de 300 mm de diamètre en relation avec un réservoir à niveau constant et déversant dans un bac jaugeur métallique avec amortisseur et déversoir triangulaire de mesure. La lame déversante tombait à l'amont du canal en bois dans un amortisseur et l'écoulement était bien calme et régulier à l'entrée du modèle. L'échelle linéaire était de 1/20e, de 1/4,47 pour les vitesses et les temps et de 1/1790 pour les débits.

Le fond d'observation en aval du radier du modèle était constitué du gravier reproduisant sensiblement la courbe granulométrique du gravier du fond de la rivière à l'échelle de 1/20e. Le diamètre effectif était sensiblement le même à l'échelle et le coefficient d'uniformité sensiblement le même. (Fig. 2.) Une grande fenêtre vitrée disposée dans une paroi du canal à l'endroit du modèle permettait d'observer les phénomènes d'érosion et d'écoulement.

Le modèle fut d'abord essayé selon l'état primitif de l'ouvrage, sans radier additionnel d'amortissement. Le tableau ci-dessous reproduit les résultats caractéristiques.

Essai	Mode d'écoulement	Fon amont (m)	Fon aval (m)	Débit réel (m ³ /sec)	Affouillements du modèle (cm ²)
1	de fond	60,00	57,50	1150	nul
2	„	60,00	56,55	910	797,5 1)
3	„	60,00	56,10	647	177,5 1)
4	„	60,00	55,92	500	nul
5	superficiel	60,00	56,00	560	442,5 1)

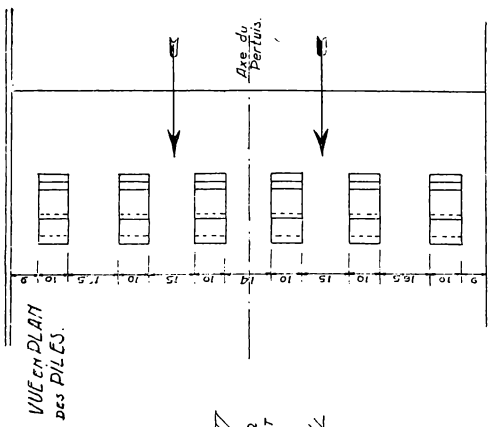
1) Voir figure 4.

La flottaison aval varie avec le débit, la rivière étant libre à l'aval. Les cotes relatives aux divers débits étaient relevées sur une courbe limnimétrique des débits d'aval communiquée par l'Administration des Ponts et Chaussées.

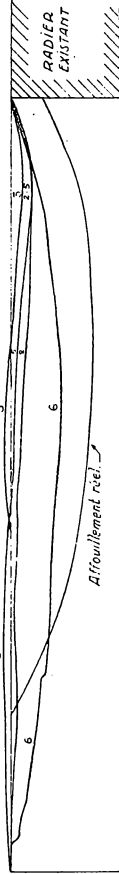
Les résultats précités montrent que la variation de la profondeur d'eau a plus d'importance sur les affouillements que la valeur du débit et que l'écoulement par dessus la hausse pivotante contribue aussi appréciablement à l'érosion.

PROFILS EN LONG DES AFFOUILLEMENTS.

Éch. 1/10 du modèle.
1/200 de la réalité.



AFFOUILLEMENTS SANS CUVETTE.



N° de l'essai	Débits	Durées	Surfaces
	litres	sec.	cm ²
3	910 M ³ /SEC.	1h.	197,5 cm ²
5	647 M ³ /SEC.	1h.	177,5 cm ²
5	550 M ³ /SEC.	1h.	149,5 cm ²
7	910 M ³ /SEC.	21h.	2687,5 cm ²
8	910 M ³ /SEC.	21h.	1490,0 cm ²
Affouillement réel			4033,0 cm ²

Sans cuvette.
Sans cuvette.
Sans cuvette.
Avec cuvette et piles.
Sans cuvette.

AFFOUILLEMENTS AVEC CUVETTE

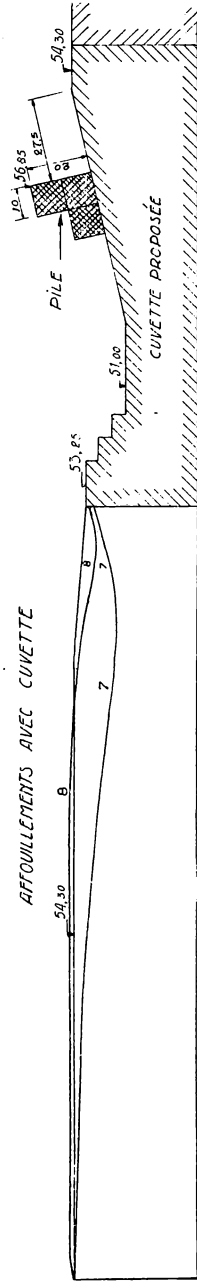


Fig. 4.

Le débit de 910 m³/sec avec écoulement de fond a été jugé le plus efficace pour l'étude de l'érosion, il correspond sensiblement à un débit de crue ordinaire. Après 21 heures, il réalise un affouillement sensiblement stabilisé de 2687,5 cm², soit environ 70 % de l'affouillement réel observé. Il est moins profond et plus allongé (fig. 4). On n'a pas poursuivi davantage la confrontation, faute de temps et aussi en raison du caractère très spécial du modèle. Reproduisant un demi-pertuis, il implique en effet une répartition uniforme du débit entre les six pertuis et ne représente pas l'effet des rives. Or, la manœuvre du barrage n'assure pas en toutes circonstances une égale répartition du débit entre les six pertuis. Les courants transversaux qui peuvent en résulter et qui influent sans doute sur la forme de la cuvette d'érosion, ne pouvaient intervenir dans le modèle. Il sera indiqué plus loin que l'érosion peut aussi être aggravée dans ce cas par diminution de la profondeur en aval.

Il ne paraissait donc pas opportun de rechercher une restitution exacte de l'érosion réelle dans le modèle. Le résultat indiqué ci-dessus parut suffisant pour le but sommaire poursuivi.

Le même débit de 910 m³/sec pendant 21 heures s'écoulant dans le modèle complété par l'avant-radier avec cuvette d'amortissement (fig. 4, essai n° 7) a produit une érosion légèrement supérieure à la moitié de celle obtenue pour le même temps sans cuvette. Il a donc paru que la cuvette ne réalisait pas un effet suffisant d'atténuation de l'érosion, bien que celle-ci fût éloignée de 30 mètres vers l'aval.

Il nous a semblé qu'un meilleur résultat ne pouvait être obtenu que par la disposition d'obstacles dans le lit en aval du barrage, obligeant les filets liquides à s'incurver vers le bas dans l'étendue du radier ou de la cuvette et permettant ainsi la formation de cylindres amortisseurs.

Nous nous sommes toutefois imposé la condition que ces obstacles ne noient pas l'écoulement sous la vanne pour aucun de débits considérés. Il fut constaté que ceci ne permettait pas la disposition d'obstacles efficaces dans l'étendue de l'ancien radier.

Les essais établirent par contre l'efficacité d'obstacles disposés dans la cuvette en aval du radier. Ces obstacles furent constitués sous forme de piles disposées avec écartement variable sur la partie inclinée du fond de la cuvette (fig. 4).

Ces obstacles reçurent des formes et des hauteurs diverses, dans le but de rechercher la position et la forme les plus favorables. L'observation ne portait plus sur l'érosion, qui devenait insignifiante dans tous les cas (voir essai n° 8, figure 4), mais sur le remous en amont des obstacles par rapport au niveau d'aval, remous rendu aussi faible que possible.

Désirant cependant différencier les diverses dispositions quant au danger d'érosion en aval, on rechercha par les essais la profondeur critique d'érosion en aval, c'est-à-dire la profondeur, inférieure à la flottaison naturelle pour le débit envisagé, en dessous de laquelle une érosion notable se manifestait. Pour le dispositif de l'essai n° 8, cette

flottaison correspondait à la cote 53,35 pour le débit de 910 m³/sec, soit 0,20 m sous la flottaison régulière.

La disposition de l'essai n° 8 (fig. 4) a d'ailleurs été reconnue la meilleure pour la cuvette de la forme proposée.

On a essayé d'autres formes de cuvettes en conservant la longueur de 30 m et des dispositions appropriées des piles. La solution optimum correspond aux essais n°s 19 et 20. Pour le débit de 910 m³/sec, la profondeur critique la plus faible a été obtenue à 0,26 m sous le niveau normal. Le remous à l'amont des obstacles n'était que de 0,15 m pour ce débit et de 0,05 m seulement pour le débit de grande crue de 2050 m³/sec (fig. 5).

Un essai a montré que la longueur de 30 m de la cuvette était convenable. Une réduction à 20 m donnait un résultat moins satisfaisant. Quant à la profondeur, il est apparu que les cuvettes dont le fond était à la cote 51,00 étaient trop profondes et avaient une tendance à s'envaser. Une diminution de profondeur de 1,50 a été reconnue excessive; une profondeur convenable aurait été réalisée à la cote 51,75 environ.

Quant au sommet des obstacles, en fixant sa cote aux environs de 56,45, le remous n'est jamais excessif et le remous de grande crue, inférieur à 0,10 m, semble être négligeable.

La notion de profondeur critique d'érosion en aval n'est pas seulement un terme de comparaison sensible et objectif des dispositifs comparés dans l'essai, mais il correspond aux effets possibles d'une inégale répartition des débits dans les divers pertuis.

En effet, si pour un débit total relativement faible, on le concentre dans un seul pertuis, la cote de flottaison en aval sera inférieure à celle qui correspond au débit six fois plus fort s'écoulant par les six pertuis et auquel correspondait l'essai sur modèle. De ce fait, la profondeur en aval peut être inférieure à la profondeur critique. Sans doute, le courant subira-t-il un épanouissement latéral et le problème ne pourrait-il être étudié que sur un modèle complet de l'ouvrage à plus petite échelle et non sur un demi-pertuis.

Néanmoins, il est possible, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, que des écoulements inégalement répartis ont pu influencer les érosions réelles relevées; la notion de profondeur critique d'érosion en explique la possibilité et le mécanisme et elle est certes digne d'attention.

Les essais, très rapidement menés, ont été satisfaisants. Cependant, la solution suggérée par leurs résultats n'a pas été appliquée. L'impossibilité d'empêcher l'érosion par le recours à une cuvette noyée seule, sans obstacles saillants sur le fond du lit, a fait adopter une solution indépendante des considérations hydrauliques, eu égard au fait que le fond rocheux inaffouillable est à relativement faible profondeur sous le radier (cote 48).

Un arrière radier de 17 m de longueur a été construit en aval de l'ancien radier, après réfection de ce dernier et remblai de l'affouillement. Un mur de garde bétonné entre deux parois de palplanches et descendant jusque sur le rocher a été édifié à la limite aval de cet arrière radier.

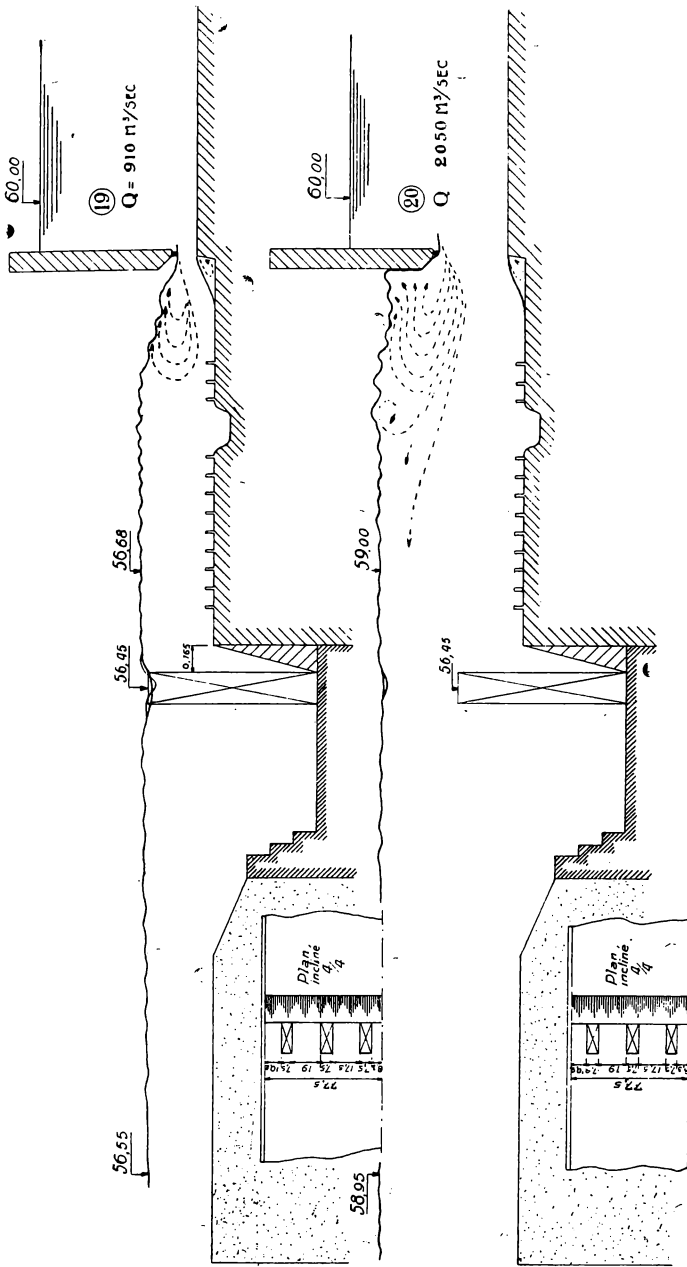


Fig. 5.

L'ouvrage a été protégé de la sorte par des paraffouilles profonds en vue de le soustraire aux conséquences des érosions ultérieures en aval.

L'Association intercommunale pour le démergement des communes de la région de Liège nous a demandé en 1943 des essais sur modèles pour déterminer les dispositifs propres à prévenir l'érosion du fond et des berges en aval d'un barrage à déversoir établi sur un torrent.

Il ne s'agit pas d'un cours d'eau important. Le débit de crue normal est de 130 l/sec seulement; le débit de crue exceptionnelle de 1830 l/sec. La largeur du déversoir n'est que de 2,50 m. Il est disposé à l'aval d'un réservoir de décantation, destiné à empêcher l'envasement de la partie aval canalisée du ruisseau, en amont de son confluent avec la Meuse. Ce déversoir contient un partuis de 1 m de largeur, obturé par des poutrelles et destiné à permettre le curage du bassin.

L'étude n'a donc guère d'importance par le cours d'eau et l'ouvrage qu'elle concerne, son intérêt réside dans la solution à laquelle elle a conduit et qui pourrait, en vertu du principe de similitude, recevoir des applications plus considérables.

Les dispositions envisagées a priori et que l'on demandait de contrôler comportaient une cuvette d'amortissement de longueur et de profondeur à préciser (fig. 6), des raccordements maçonnés avec les berges du ruisseau (dont le profil calibré est reproduit à la figure 7) et éventuellement des arrières-radiers de protection.

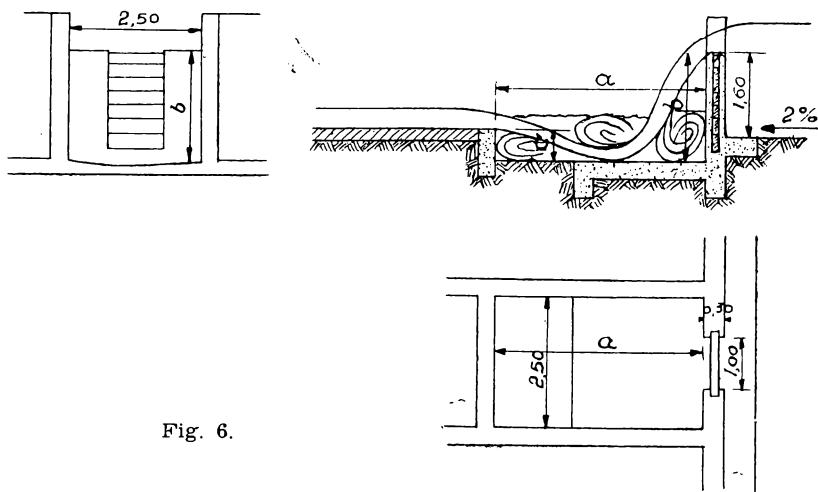


Fig. 6.

Un modèle au 1/5e a été réalisé dans le canal qui a servi à l'étude ci-dessus; il était disposé au droit des fenêtres d'observation. Les échelles des vitesses et du temps étaient 1/2,23; celle de débits 1/56. Les résultats des essais ont conduit aux conclusions suivantes:

1°) Les dispositions prévues (fig. 6) sont impropres à prévenir l'érosion au fond et des berges.

2°) Cela provient principalement de ce que la largeur du déversoir est trop faible. Un résultat beaucoup plus satisfaisant a été atteint en portant la largeur du déversoir à 3,18 m, qui est la largeur moyenne de la section nouillée du ruisseau en aval (fig. 7).

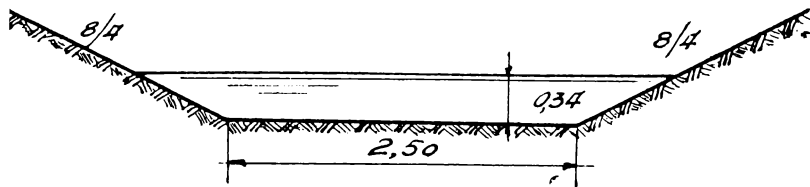


Fig. 7.

3°) Moyennant cette largeur, on est parvenu à prévenir dans le modèle toute érosion du fond et des berges en aval du déversoir par les dispositions suivantes :

- une cuvette d'amortissement de 3,18 m de largeur, 5,00 m de longueur minimum et 0,75 m de profondeur;
- dans l'étendue de cette cuvette, à 2,65 m en aval du déversoir un seuil en saillie de 0,35 m sur le fond de la cuvette et de 0,55 m de largeur.
- des perrés gauches de raccordement relativement courts; une longueur de 2,00 m paraît convenable.
- un arrière radier bétonné d'une longueur minimum de 1,30 m en aval de la cuvette de 5,00 m de longueur. (On lui donnera de préférence la même longueur que les perrés.) La figure 8 représente un dispositif de ce genre, essayé avec une cuvette de 6,00 m de longueur.

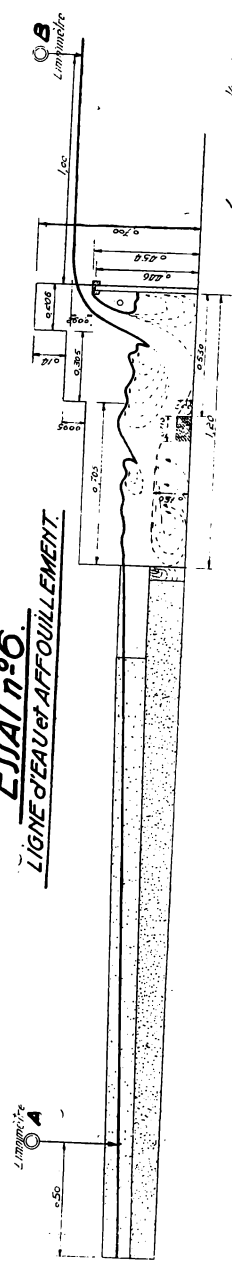
Pour contrôler le dispositif finalement proposé au point de vue de l'érosion du fond, on s'est servi de matériaux de fond plus fins que ceux du ruisseau réel, considérés à l'échelle du modèle. On a ainsi créé une marge de sécurité appréciable.

En ce qui concerne les berges, leur tendance à l'érosion était assez sensible. De trop longs perrés de raccordement et notamment des perrés disposés dans l'étendue de la cuvette d'amortissement donnaient lieu à des érosions notables des berges.

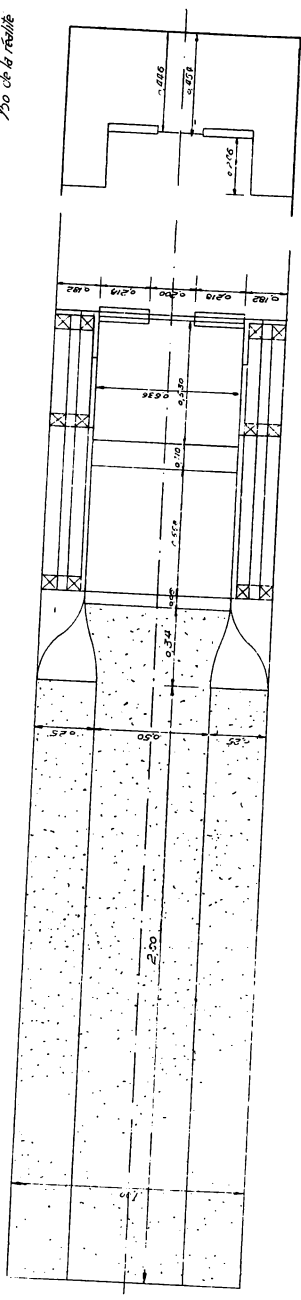
Le projet de l'ouvrage a été mis au point en concordance avec la solution préconisée ci-dessus; sa réalisation est prochaine.

ESSAI n°6.

LIGNE D'EAU et AFFOUILLEMENT.



ÉCHELLE: $\frac{1}{50}$ du modèle
 $\frac{1}{50}$ de la réalité



DÉVERJOIR
PU D'AVANT.

Fig. 8.