

United States Department of the Interior
Bureau of Reclamation
Engineering and Research Center

Translation No.: 2174
Team No.: General
Book No: 12,943

HYDRAULICS BRANCH
OFFICIAL FILE COPY

XX

FLOW AND ENERGY DISSIPATION IN GABION STEPPED WEIRS

Ecoulement et dissipation sur les déversoirs en gradins de
gabions

by

L. Peyras, P. Royet, G. Degoutte

from

LA HOUILLE BLANCHE NO. 1-1991

Translated by

Jean-Claude Arteau

XX

Division of Foreign Activities
Code D-2000

USBR Translations
Denver, Colorado
August, 1991

Flow and energy dissipation in gabion stepped weirs

L. Peyras, P. Royet, G. Degoutte

ABSTRACT. Gabions are commonly used for building small dams in the Sahel region of Africa; gabion weir technology is widespread in flood spillways. In addition to good mechanical stability and a high level of resistance to flood flows, a gabion weir dissipates large amounts of energy above the stilling basin. Nevertheless, the optimum dimensions for this type of structure are not yet well defined. In order to quantify the energy dissipated on the steps of such structures, a systematic study of standard spillways 3 to 5 m high, with flowrates up to $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, has been carried out on a 1:5 scale model.

The energy dissipation has been quantified and the dimensioning parameters of the stilling basin have been determined. The test results led to a 10 to 30 % reduction of the stilling basin length compared to the methods previously used. The study also attempted to characterize flow over steps and define the phenomena observed during the different hydraulic regimes.

Introduction

Gabions remain the preferred material for building hydraulic structures. Especially in the Sahel region of Africa, the social, economic and technical contexts are such that gabions are commonly used for building small earth dams. The design of these dams is relatively standard; in particular, gabions are commonly used in flood spillways. As a matter of fact, gabion spillways offer a solution which is often selected. These weirs are characterized by good mechanical stability, high resistance to flood flows and relative ease of construction.

Nevertheless, the rules for dimensioning this type of weir are not well established, especially the length of the stilling basin. The existing literature on gabion structures at best proposes methods similar to those applied to smooth inclined weirs [3] or to straight drop weirs [1]. The analytic methods provided do not take into account the energy dissipation due to the stepped profile, and lead to oversized stilling basins. Only STEPHENSON has run tests on gabion stepped sills at the 1:10 scale [9]. However, the scale models were less than 4 m in height and involved infiltration through the upstream facing, thus restricting the application of the test results to permeable sills in streams.

Because of the complexity of flow over stepped surfaces and within the gabions themselves, analytic methods such as numerical modelling are hard to apply and scale models remain the preferred method of investigation. Many stepped weirs have been tested,

mainly in connection with large concrete dams for which infiltration phenomena are excluded and transient hydraulic regimes, basic to our study, are negligible [4], [8].

For these reasons, we carried out scale model testing in order to observe flow over small weirs with steps of uniform height, in order to quantify the energy dissipation over "standard" gabion stepped weirs and to establish the dimensioning parameters for the stilling basin. Finally, we attempted to analyse gabion deformation and some problems related to the durability of structures during floods.

Scale model testing

Scale models

The 1:5 scale used was sufficiently large to approximate closely the actual hydraulic phenomena and minimize similitude and measurement errors. The gabions used in the model were exactly at the 1:5 scale, i.e. geometric dimensions of 20 cm x 20 cm x 60 cm (actual gabions of 1 m x 1m x 3m), hexagonal wire mesh of 20 mm x 30 mm (actual 100 x 120 mesh type) and 0.7 mm wire diameter (3.5 mm actual diameter), and filling aggregate (30 to 40 mm ballast). The terminology and units used in this paper are described in the appendix.

Testing was carried out in the 80 cm wide glass-enclosed canal of the Société du Canal de Provence. The simulated flowrates (10 per test) ranged from 0.5 to 3 m³.s⁻¹.m⁻¹. Only the downstream dam facing was reproduced; the upstream facing was replaced with a waterproof membrane.

We tested energy dissipation on weirs having the following characteristics (*fig.1*):

- downstream facing slopes of 1:1, 1:2 and 1:3;
- weir heights of 3, 4 and 5 m, i.e. 3, 4 and 5 steps respectively (standard step height of 1 m).

Different stepped profiles were reproduced (*fig. 2*):

- gabion steps or "bare" gabions;
- steps with a tread protected by a horizontal concrete slab; the "concrete slab" technique is recommended when floodwaters are loaded with sediments;
- steps with a tread protected by a "counter-sloped" concrete slab;
- steps with a nose having a "counter-sill" made of a flat gabions.

The flow of water over surface weirs is characterized by high velocities. The gravitational force dominates all other external forces, allowing Froude's similitude to be used. All results correspond to the 1:1 scale.

Instruments

The specific loads at the weir toe were measured with a *Pitot ramp*, i.e. a series of Pitot tubes placed along a cross-section and connected to the same reading tube. This ramp, a copper tube with small openings facing the flow lines, integrates the specific load (H_s) over a weir section. As opposed to a Pitot tube which would record all flow variations at a specific point of the section, the *Pitot ramp* gives stable readings of (H_s). An accurate calibration of the ramp gave a default error between 6 and 10 % depending on the flowrate; the test results were correspondingly increased.

The flowrate of the water entering the glass-enclosed canal was measured with a standard thin-walled triangular weir. Volume measurements have shown the flowrate error to be less than 3 %.

Testing methodology

The total initial head of the flow over the sill (E_0) is calculated in the critical section, from the flowrate :

[Formula]

H : weir height

Y_c : critical depth; $Y_c = (q^2/2g)^{1/3}$, with q the flow rate per unit of sill length (in $m^3.s^{-1}.m^{-1}$).

The residual head (E_1) at the weir toe (at the stilling basin entrance, upstream of the jump) is measured with the *Pitot ramp*. The head loss $E_0 - E_1$ can then be calculated.

Flow over steps

Testing has shown two flow types: *nappe flow* and *skimming flow*.

Nappe flow

Nappe flow is observed for low to medium flowrates. The overflowing sheet of water strikes the tread of the next lower step, totally first (*free nappe*) and then partially (*partial nappe*).

Free nappe flow

Two hydraulic regimes are possible, one characterized by the alternation of fluvial and torrential regimes, and the other

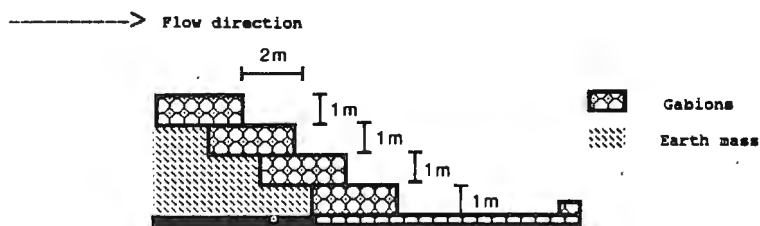
exclusively torrential.

a. *Alternation of fluvial and torrential regimes*: an hydraulic jump begins just downstream of the striking point of the overflowing sheet of water. This type of flow has been observed only for counter-sloped or counter-silled profiles and for low flowrates (lower than $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

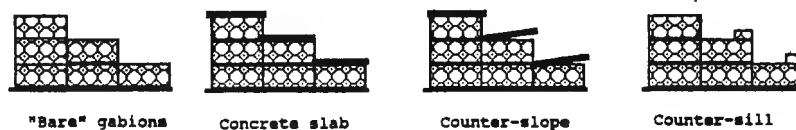
A simple model can be proposed for this particular case, which correlates well with our test results (fig. 3):

- at the striking point of the overflowing sheet of water, the flow has a minimal depth Y_1 . Under the sheet of water, at the foot of the step, a water cushion forms, with a depth Y_p ;
- the jump starts in section 1;
- just downstream of the jump in section 2, the flow becomes fluvial, with the depth Y_2 ;
- between section 2 and section 3, the flow speeds up because of the drop, becomes torrential again and takes the critical depth Y_c in section 3.

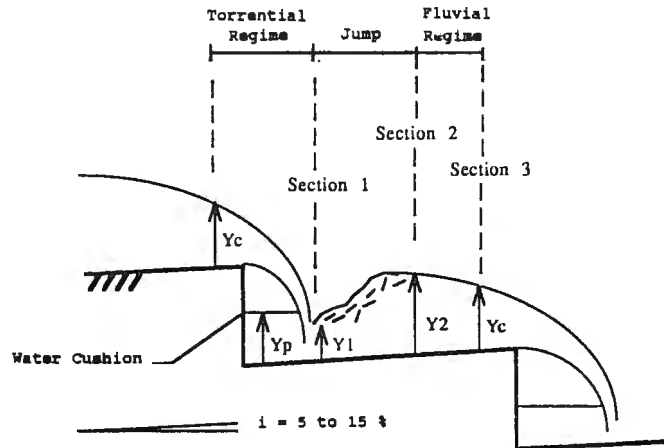
The hydraulic conditions are identical from one step to the next; for each step, the flow dissipates an amount of energy equivalent to its height. We can then propose an energy dissipation formula for stepped weirs and *free nappe flow*:



1. Example of a downstream stepped facing made of gabions (height 4 m and slope 1:2), with the gabion-lined stilling basin at the weir toe.



2. Stepped profiles included in the tests



3. Free nappe flow with alternation of fluvial and torrential regimes.

- weir crest energy:

$$E_0 = n \cdot h + 3/2 Y_c, \text{ for a weir with } n \text{ steps, each } h \text{ meters high (} nh = H \text{).}$$

- weir toe energy:

$$E_1 = Y_1 + V_1^2/2g$$

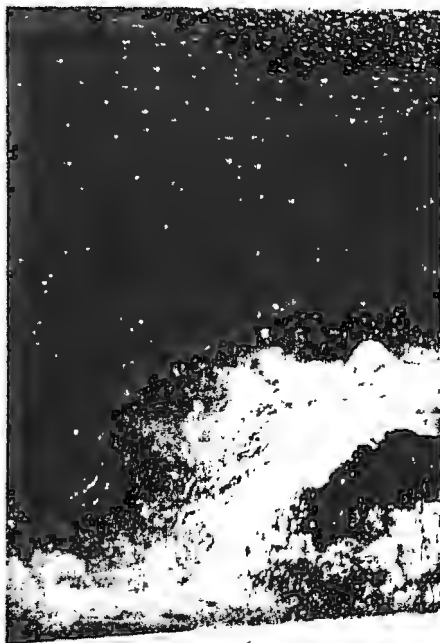
$$\Rightarrow E_0 - E_1 = n \cdot h + 3/2 Y_c - Y_1 - q^2/(2g \cdot Y_1^2) \quad (1)$$

RAND has investigated the hydraulic behavior of water falling onto a concrete step h meters high; he proposes a set of empirical equations defining the parameters: [7]

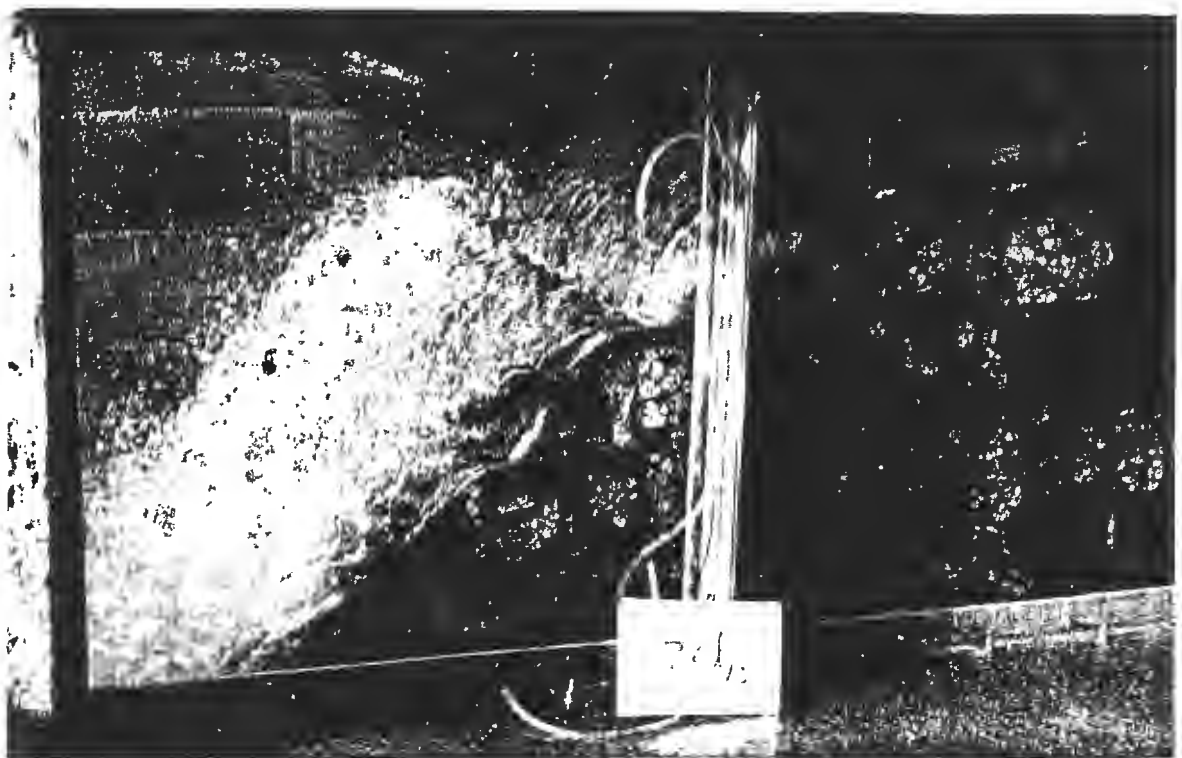
$$\begin{aligned} Y_1/h &= 0,54 \cdot (q^2/(g \cdot h^3))^{0,425} \\ Y_2/h &= 1,66 \cdot (q^2/(g \cdot h^3))^{0,27} \\ Y_p/h &= (q^2/(g \cdot h^3))^{0,22} \end{aligned} \quad (2)$$

with q the flowrate ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$) of the sheet of water and (Y_1 , Y_2 , Y_p) the depths defined above.

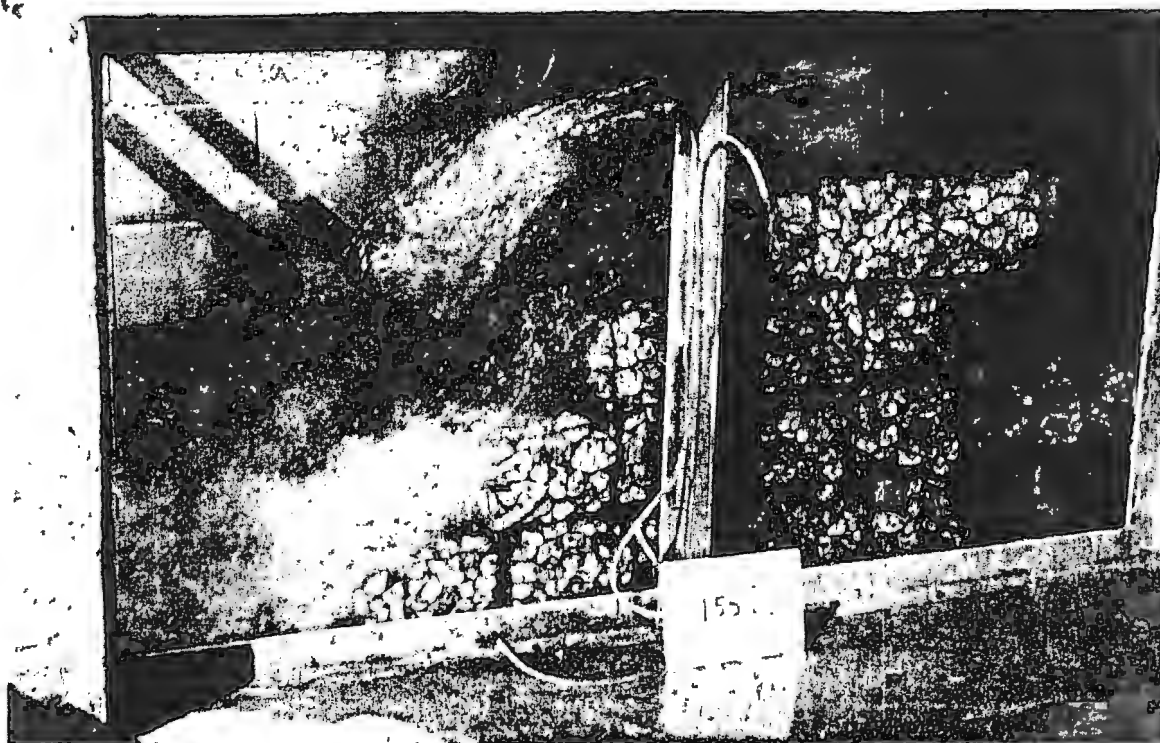
By combining equations (1) and (2), we can calculate the head loss over stepped weirs, and check the validity of these formulas for gabion structures by using $h = 1$ m. The test results for *free nappe flow*, but also for all types of *nappe flow*, are close to those from modelling: the actual energy dissipation is at most 10 % greater than that calculated from the model. This difference between testing and modelling can be attributed to the fact that some parameters such as infiltration into the gabions, roughness difference between gabions and concrete and weir slope, are not taken into account in the analytical model.



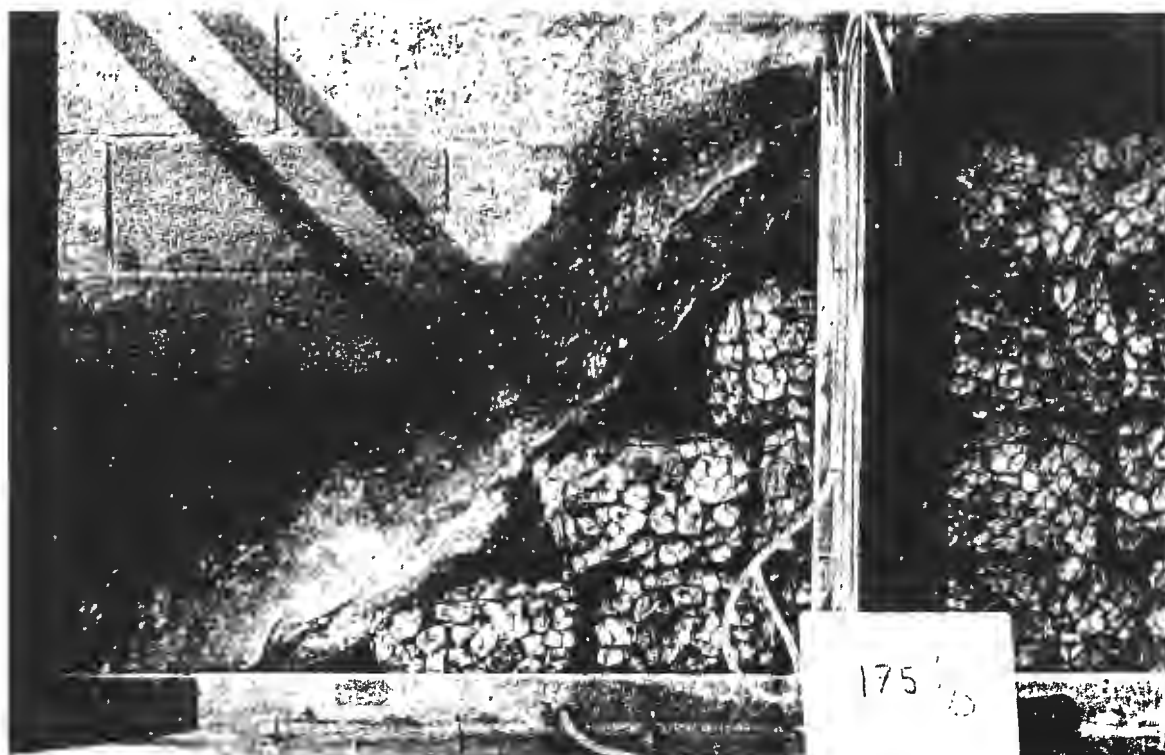
(A)



(B)



(C)



(D)

A. Free nappe flow over a weir of slope 1:3 and height 4 m; counter-sloped steps; alternation of fluvial and torrential regimes; flowrate of $0.60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.

B. Free nappe flow over a weir of slope 1:1 and height 5 m; steps with concrete slab protection; torrential regime; flowrate of $1.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.

C. Skimming flow over a weir of slope 1:1 and height 5 m; steps of "bare" gabions; torrential regime; flowrate of $2.17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.

D. Skimming flow over a weir of slope 1:1 and height 5 m; steps of "bare" gabions; torrential regime; flowrate of $2.45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.

b. *Torrential regime*: Without a counter-sill or a counter-slope, water velocity remains high and the hydraulic jump is forced downstream of the step. Intense bubbling can be observed downstream of the striking zone of the overflowing sheet of water, but the flow remains torrential over the entire weir (fig. 4).

The nappe flow regime over horizontal steps ("bare gabion" or "concrete slab" profiles) is always torrential. For "counter-sloped" or "counter-silled" weirs, the regime becomes torrential above a certain flowrate.

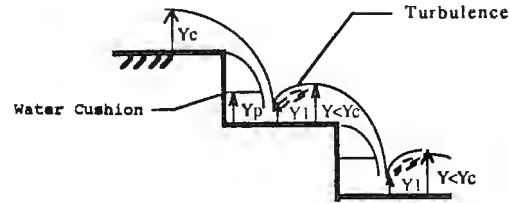
Partial nappe flow

The overflowing sheet of water partially strikes the tread of the next lower step and the jet bursting at each step generates intense bubbling. The regime remains torrential over all the steps (fig. 5).

Nappe flow energy dissipation

Nappe flow energy dissipation occurs in two phases: when the sheet of water strikes the step, then in the zone of intense bubbling after the jet has burst, with or without formation of an hydraulic jump.

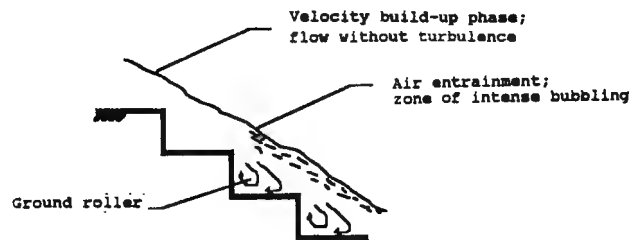
As a first approximation, we can evaluate the energy dissipation over gabion weirs by extrapolating the modelling of free nappe flow to all types of nappe flow. Our results show that this extrapolation of formulas (1) and (2) is valid within 10 %.



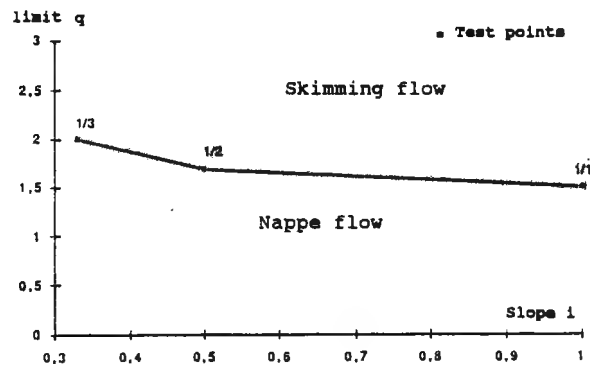
4. Free nappe flow with constant torrential regime



5. Partial nappe flow



6. Skimming flow



7. Limit unit flowrate q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{ml}$) between nappe and skimming flows, as a function of slope i (m/m) for stepped weirs made of "bare" gabions.

Skimming flow

Skimming flow was observed for average to high flowrates; the sheet of water is not visible and the weir is totally submerged in a fast and relatively smooth current.

From upstream to downstream, two zones can be identified (fig. 6):

- A first transient zone over the first two steps; the flow accelerates until it reaches the maximum limit velocity $V_{\max}$ for which air entrainment begins; there is no bubbling during this velocity build-up phase and the upper surface of the flow is smoothly undulated over the weir.

- The flow reaches the limit velocity $V_{\max}$ for which air entrainment begins. Air particles mix with the stream of water and intense bubbling develops down to the weir toe. The water cushion at the foot of each step is replaced by a ground roller showing the rotation of entrained air bubbles; the stream of water moving along the weir is supported by the ground rollers and the noses of steps.

The onset velocity of air entrainment depends only on the weir characteristics, especially step height ($h = 1$ m in this case) and tread width. Whatever the flowrate of the simulated flood (up to $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$), the measured values of $V_{\max}$ ranged from 5.5 to 6 m/s depending on weir slope. When $V_{\max}$ was attained, the water velocity decreased slightly; in addition to losing h meters of potential energy per step, the flow also dissipated some of its kinetic energy.

RAJARATNAM proposes a *skimming flow* model based on tests carried out by SORENSEN [6], [8].

Boundary between nappe and skimming flows

Skimming flow develops for flowrates higher than those of *nappe flow*. The geometrical characteristics of the steps are definitely a factor in the onset of air entrainment: a steep slope and horizontal steps are conducive to *skimming flow*. Figure 7 shows the boundary between the two flow regimes.

Energy dissipation over gabion weirs

Dimensionless presentation of the results

The parameters controlling flow over gabion steps are the following:

- the weir slope i and height H , sole determinants of the downstream facing geometry (H meters are equivalent to H steps);
- the step profile, with or without counter-sill or counter-slope; initially, we will only consider "bare" gabion steps with horizontal treads;
- the flowrate per unit of length which, together with the slope i , determines the flow type (*nappe* or *skimming*);
- the gravitational force which dominates all other external forces.

For "bare" gabion steps, four parameters are necessary to completely express the dimensionless variable $(E_0 - E_1)/H$ (head loss per unit of weir height):

$$(H_0 - E_1)/H = f(q, H, i, g)$$

Using traditional methods, we can determine two dimensionless parameters describing $(E_0 - E_1)/H$:

- the first is obviously the slope i of the stepped weir;
- the second combines q , H and g in a way comparable to the square of Froude's number:

$$q^2/(g \cdot H^3).$$

The following relation can thus be written:

$$(E_0 - E_1)/H = f_1(i, q^2/(g \cdot H^3)).$$

In the same way, the dimensionless variable Y_1/H (weir toe depth over weir height) is written as follows:

$$Y_1/H = f_2(i, q^2/(g \cdot H^3)).$$

Test results are represented by graphs (*figs. 8 and 9*) in the coordinates systems $[Y_1 = (E_0 - E_1)/H; X = q^2/(g \cdot H^3)]$ and $[Y_2 = Y_1/H; X = q^2/(g \cdot H^3)]$ respectively, for different values of i :

- considering that Y_1 and Y_2 approach 1 and 0 respectively when X approaches 0, the curves under consideration are of the form:

$$1/(1 - Y_1) = a_1 \cdot X^{b_1} \quad Y_2 = a_2 \cdot X^{b_2};$$

- these curves are fitted to the test results by using the least square method after a logarithmic transformation.

The best-fit coefficients are provided in tables I and II.

Table I

Relationship between $Y_1 = (E_0 - E_1)/H$ and $X = q^2/(g.H^3)$ in the form $1/(1 - Y_1) = a_1.X^{b_1}$; best-fit coefficients a_1 and b_1 ; coefficient of determination r^2 .

	Ln (a_1)	b_1	r^2 (Coef. of determination)
Slope 1:3 (16 pairs)	-1.568	-0.647	0.904
Slope 1:2 (25 pairs)	-1.778	-0.654	0.964
Slope 1:1 (28 pairs)	-1.434	-0.526	0.874

Table II

Relationship between $Y_2 = Y_1/H$ and $X = q^2/(g.H^3)$ in the form $Y_2 = a_2.X^{b_2}$; best-fit coefficients a_2 and b_2 ; coefficient of determination r^2 .

	Ln (a_2)	b_2	r^2 (Coef. of determination)
Slope 1:3 (15 pairs)	-1.074	0.248	0.974
Slope 1:2 (25 pairs)	-1.157	0.247	0.941
Slope 1:1 (28 pairs)	-1.163	0.263	0.888

Domain of validity of the graphs

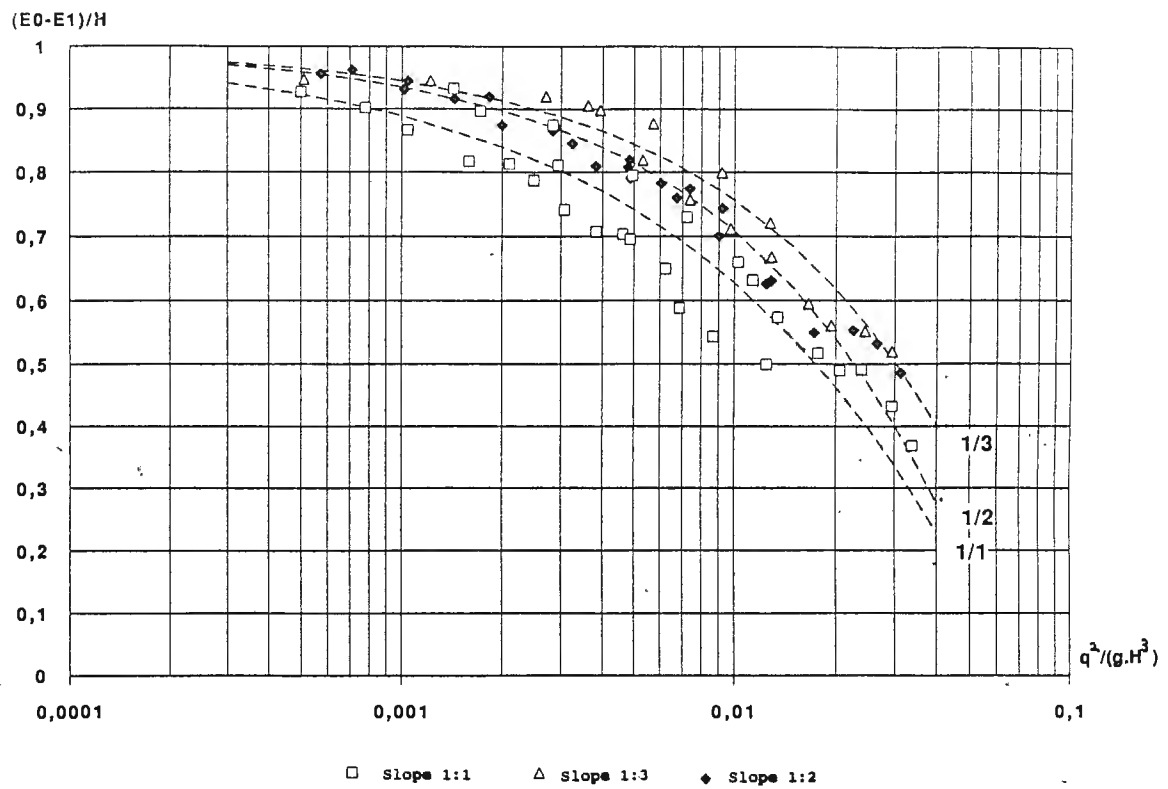
Only flowrates of less than $3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}.\text{ml}^{-1}$ are considered, since the weir could be damaged by higher flowrates (see the "gabion deformation" section).

The graphs (figs. 8 and 9) represent tests carried out on weirs 3, 4 and 5 m high. The dimensionless representation allows us to extrapolate these results. We nevertheless recommend restricting extrapolation to heights between 2 and 7 m, in order not to deviate too much from our test range.

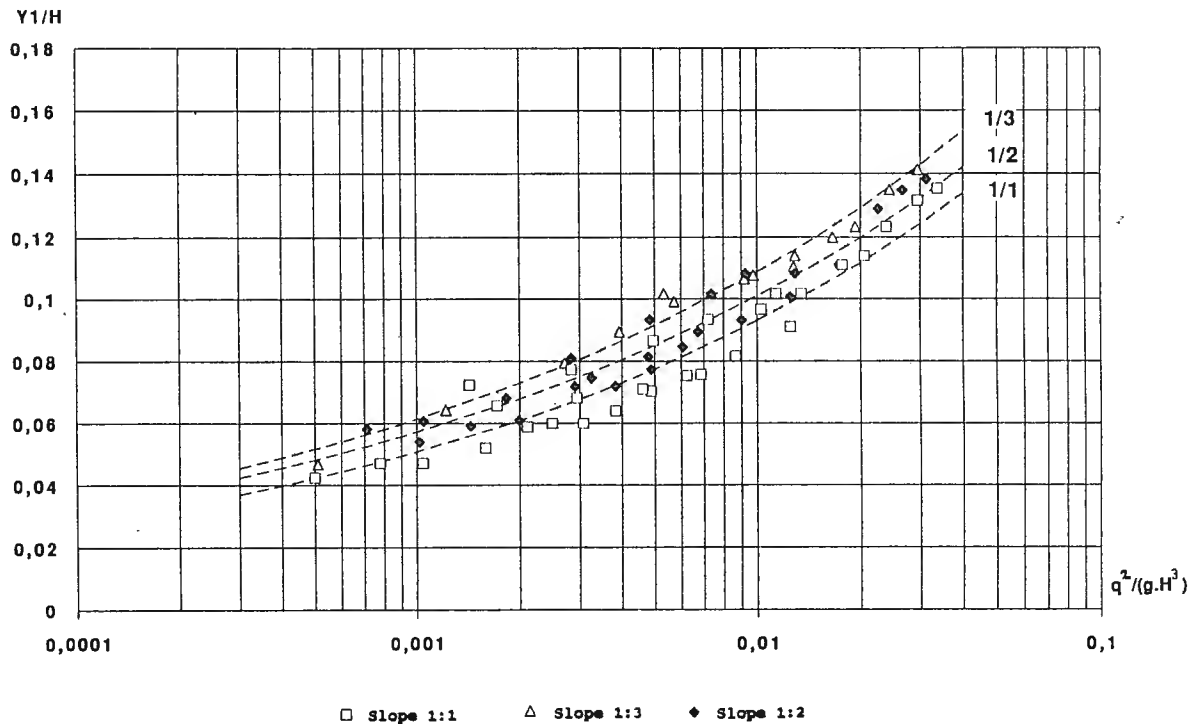
The results can nevertheless be interpolated for weirs with slopes between those we experimented with, 1:1.5 or 1:2.5 for example.

Methodology for dimensioning the stilling basin

Knowing the weir geometry (slope, height and spilling length) and the flood parameters of the project, this study allows us to determine the depth Y_1 corresponding to "bare" gabion steps (graph of fig. 9)



8. Unit head loss over a stepped weir made of "bare" gabions

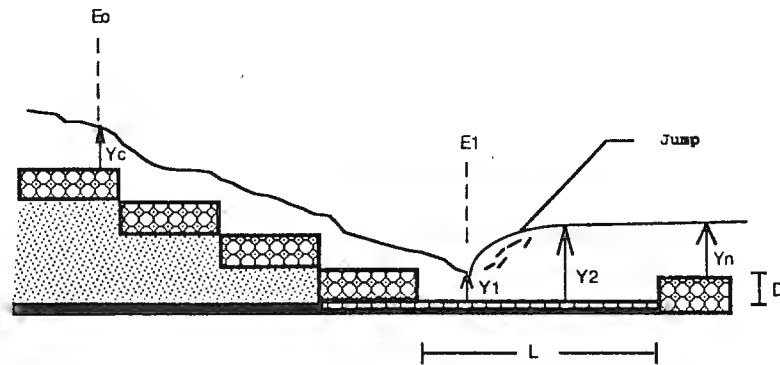


9. Depth Y_1 at the toe of a weir made of "bare" gabions

In order to dimension the stilling basin, we need to calculate (fig. 10):

- the Froude's number at the weir toe:

$$F_1 = q(g \cdot Y_1^3)^{1/2}$$



10. Dimensioning of the stilling basin

- the conjugate depth Y_2 at the jump end:

$$Y_2 = 0.5 \cdot Y_1 \cdot [(1 + 8 \cdot F_1^2)^{1/2} - 1]$$

- the length L of the stilling basin, using the empirical formula [11]: $L = 6 Y_2$

- the depth D of the stilling basin in order to reach the normal depth Y_n of the stream; Y_n depends only on downstream conditions:

$$D = Y_n - Y_1$$

The type of step determines the energy dissipation:

- the concrete slabs on the step treads partially seal the weir and energy dissipation is reduced; to accurately dimension the stilling basin, testing has shown that the length L calculated by using the above method for "bare" gabion steps should be increased by 15 %, 8 % and 0 % respectively for the slopes 1:3, 1:2 and 1:1.

- counter-slopes and counter-sills create water pockets which cushion the overflowing sheets of water and lead to the formation of hydraulic jumps, thus improving energy dissipation. Depending on the slope of the weir, the length of the stilling basin can be reduced by up to 10 % [5].

Discussion

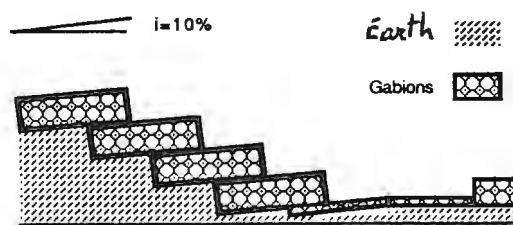
The head loss per unit of height $(E_0 - E_1)/H$ decreases sharply when $q^2/(g.H^3)$ increases and thus, for H constant, when the flowrate increases. This phenomenon is explained by the change of regime (from *nappe* flow to *skimming* flow) which occurs when $q^2/(g.H^3)$ increases. The energy dissipated by *skimming* flow is much lower than that of *nappe* flow.

We also see that the graphs of variables $(E_0 - E_1)/H$ and Y_1/H for various slopes tend to merge when $q^2/(g.H^3)$ (and thus q) decreases. As was shown for the modelling of *free nappe* flow, the same hydraulic conditions exist for each step, independently of the weir slope.

Gabion deformation

Scale model testing has shown some deformation of the gabions used for building the weirs. Gabions are subject to shifting of their filling material, and thus should be constructed with great care, as described in [2]:

- quality and placement of the stones in the upper portion of the gabions ;
- strict conformity with granulometric rules (size of material more than 1.5 times the mesh size).



11. Counter-sloped weir

If the gabions are exposed to high floods (above $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$), the wire mesh and the ties must be reinforced. It is also recommended to increase the rigidity of the wire cage with a third row of additional tie-rods and to increase the number of diaphragms in the gabions.

The solid particles transported by the stream may abrade or even break the wire mesh of the gabions. When such a risk is present, each step tread can be protected by pouring a concrete slab, 5 to 10 cm thick.

The gabions can be counter-sloped simply by tilting the entire weir in the upstream direction (*fig. 11*). In that case, the step treads can also be protected by concrete slabs.

In addition to increasing energy dissipation, this type of facing increases the overall stability of the structure. It nevertheless requires more sophisticated technical means to place the tilted gabions.

Conclusion

Provided the construction rules are respected, weirs with a stepped downstream facing made of gabions can withstand floods up to $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$ without noticeable damage. This is without any doubt the only gabion spilling structure capable of withstanding such floods; on the other hand, sloped downstream facings made of gabions cannot withstand floods in excess of $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$ [2], [5].

Moreover, stepped weirs induce a high level of energy dissipation above the stilling basin. This study has shown how to quantify this dissipation over the steps and to establish the parameters of the basin.

The final results lead to a 10. to 30 % reduction of the stilling basin length in comparison with traditional methods. Knowing the cost of the flood spillway on this type of dam, the savings amount to 5 to 10 % of the project cost.

Acknowledgments

We wish to thank the Société du Canal de Provence for the valuable help which was provided during the experimental work.

APPENDIX

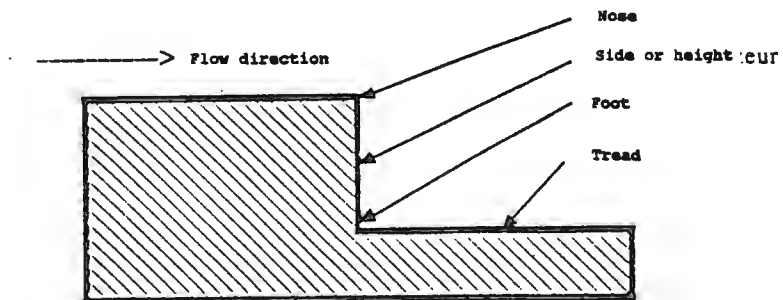
1. Units

ml	linear meter
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$	flowrate per unit length of sill
m/m	weir slope

2. Notation

Y_c	Critical depth
Y_1	Weir toe depth
Y_2	Conjugate depth of Y_1 , downstream of the jump
Y_p	Water cushion depth under the overflowing sheet of water
E_0	Total load of the flow on the weir sill
E_1	Total load of the flow on the weir toe
q	Flowrate per unit length of sill
g	Gravitational acceleration
H	Weir height
h	Step height
n	Number of steps of the weir
i	Weir slope
V_m	Flow velocity in section m
H_s	Specific load: $H_s = Y + V^2/2g$

3. Terminology for steps



References

- [1] AGOSTINI R., BIZARRI A., MASETTI M.: *Ouvrages flexibles pour tronçons torrentiels et fluviaux (1^{re} partie : Ouvrages transversaux)*. [Flexible structures for torrential and fluvial sections (First part: Transverse structures).] Ed. France Gabions s.a., Le Pouzin, 1987.
- [2] CEMAGREF: *Les ouvrages en gabions*. [Gabion structures.] In the course of publication by the French department of cooperation and development. Previous publication : *Collection Techniques Rurales en Afrique*. [Series on Rural Techniques in Africa.] Ed. Eyrolles, Paris. 1974.
- [3] DURAND J.-M.: *Etude de variantes techniques dans la conception des petits barrages en terre au Burkina Faso*. [Study of technical alternatives for small earth dams in Burkina Faso.] Ed. CEMAGREF, Aix-en-Provence Group, Le Tholonet, May 1989.
- [4] ESSERY S.. HORNER W.: *The hydraulic design of stepped spillways (CIRIA Report 33)*. Ed. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), London, January 1978.
- [5] PEYRAS L.: *Etude de la dissipation de l'énergie sur les déversoirs en gradins de gabions*. [Study of energy dissipation on stepped weirs made of gabions.] Ed. CEMAGREF, Aix-en-Provence Group, Le Tholonet, May 1990.
- [6] RAJARATNAM N.: *Skimming flow in stepped spillways*. J. hydraul. eng. ASCE, vol. 116. no. 4, April 1990, pp. 587-591.
- [7] RAND W.: *Flow geometry at straight drop spillways*. Proc. ASCE, 81 E, Paper 791, September 1955, pp. 1-13.
- [8] SORENSEN R.M.: *Stepped spillway hydraulic mode investigation*. J. hydraul. eng., ASCE, vol. 111. No. 12, December 1985, pp. 1461-1472.
- [9] STEPHENSON D.: *Gabion energy dissipators*. Thirteenth Congress on Large Dams. New-Delhi, 1979. Ed. International Commisiion on Large Dams, Q. 50, R. 3, pp. 33-43, 1979.
- [10] STEPHENSON D.: *Rockfill in hydraulic engineering*. Ed. Elsevier Scientific Publishing Company, Developments in Geotechnical Engineering Series, vol. 27, Amsterdam, Oxford, New York, 1979.
- [11] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (Bureau of Reclamation). *Design of small dams*. Ed. Water Resources Technical Publication (United States Government Printing Office), Denver, 1987.

Écoulement et dissipation sur les déversoirs en gradins de gabions

L. Peyras, P. Royet, G. Degoutte*

Introduction

Les gabions demeurent des matériaux privilégiés dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques. En Afrique Sahélienne notamment, le contexte social, économique et technique rend leur utilisation courante dans les petits barrages en terre. Ces retenues sont de conception relativement standardisée; en particulier, on emploie usuellement les gabions dans les évacuateurs de crue. A cet égard, les évacuateurs en gradins de gabions sont une solution fréquemment adoptée. Ces structures déversantes présentent une grande stabilité mécanique ainsi qu'une bonne résistance au déferlement de crues; en outre, leur mise en œuvre est aisée.

Cependant, les règles de dimensionnement de ce type de déversoirs sont mal établies, en particulier en ce qui concerne la méthode de calcul du bassin de dissipation. Dans l'état actuel des connaissances, les manuels traitant d'ouvrages en gabions proposent au mieux des méthodologies analogues à celles utilisées pour les déversoirs en pentes inclinées sans gradins [3], ou pour les déversoirs en chute verticale [1]. En aucun cas les calculs mentionnés ne prennent en compte la pré-dissipation qu'offre la structure en marches d'escalier, si bien que le bassin de dissipation est largement surdimensionné. Seul STEPHENSON a expérimenté des seuils en gradins de gabions à l'échelle 1/10 [9]. Cependant, les

modèles testés n'excèdent pas 4 m de hauteur, et surtout, ils font intervenir des infiltrations à travers le parement amont, ce qui limite l'application de ses résultats aux seuils perméables en rivière.

Devant la complexité des écoulements sur les gradins et au sein des gabions, des méthodes de calcul telles que la modélisation numérique sont difficilement applicables et les modèles réduits restent l'outil privilégié. De nombreux déversoirs en gradins ont fait l'objet d'expérimentations. Elles concernent essentiellement les grands barrages en béton, où les phénomènes d'infiltrations sont exclus et où les régimes hydrauliques transitoires, fondamentaux dans notre étude, sont négligeables [4], [8].

Nous avons donc réalisé une expérimentation sur modèles réduits afin d'observer les écoulements sur des petits déversoirs en marches d'escaliers homogènes, de quantifier précisément la dissipation de l'énergie sur les déversoirs « standards » en gradins de gabions, et d'établir les paramètres qui détermineront le bassin de dissipation. Enfin, nous nous sommes attachés à analyser les déformations des gabions et les problèmes liés à la pérennité de l'ouvrage lors du passage des crues.

* CEMAGREF, groupement d'Aix-en-Provence, B.P. 31, Le Tholonet, 13612 Aix en Provence Cedex 1, Tél.: 42 66 93 10.

Flows and dissipation of energy on gabion weirs

The use of gabions in the small dams in the Sahel regions of Africa is quite common, they are used in flood spillways in which the gabion weirs are usual techniques. Indeed, apart from a good mechanical stability and a high level of resistance to flood flows, gabion weirs enable a large amount of pre-dissipation of water energy before the stilling basin. In the present state of the technique the right dimensions for this type of structure are not well known. To define energy dissipation on the shoulders a systematic study of the standardized wasteways from 3 to 5 m high, for a flow rate of up to 3 m³/s per meter width, has been carried out on scale models on 1/5 scale.

It has enabled the amount of energy dissipation to be quantified and enabled determination of dimensioning parameters for the stilling basin. The results obtained lead to a saving of 10 to 30 % over the length of the stilling basin compared to the lengths obtained with the methods used up to present. Moreover, we also wished to classify the flows on the shoulders and define the phenomena observed during the different hydraulic regimes.

Expérimentation sur modèles réduits

Les modèles réduits

L'échelle 1/5 adoptée est suffisamment grande pour se rapprocher au plus près des phénomènes hydrauliques réels et minimiser les erreurs de similitude et de mesure. Les gabions en modèle réduit sont rigoureusement à l'échelle 1/5 : dimensions géométriques (20 cm × 20 cm × 60 cm soit des gabions réels de 1 m × 1 m × 3 m), mailles hexagonales torsadées (20 mm × 30 mm soit une maille réelle du type 100 × 120), diamètre des fils (0,7 mm soit un diamètre réel de 3,5 mm), et granulats de remplissage (ballast de 30 à 40 mm). La terminologie et les unités utilisées sont décrites en annexe.

L'expérimentation a été conduite dans le canal vitré de la Société du Canal de Provence. Sa largeur est de 80 cm. Les débits simulés s'étendent de 0,5 à 3 m³.s⁻¹.ml⁻¹ à raison d'une dizaine de débits par expérience. Seul le parement aval de barrage est reproduit ; le parement amont est remplacé par une membrane étanche.

Nous avons testé la dissipation sur des déversoirs dont les caractéristiques prennent les valeurs suivantes (fig. 1) :

- pente du parement aval : 1/1, 1/2 et 1/3 ;
- hauteur du déversoir : 3 m, 4 m et 5 m, soit respectivement 3, 4 et 5 gradins, la hauteur d'un gradin étant standardisée (1 m).

Différents profils de gradins ont été reproduits (fig. 2) :

- gradins en gabions ou gabions « nus » ;
- gradins dont les girones sont protégés par une galette horizontale en béton ; la technique de la « galette en béton » est préconisée quand les crues sont accompagnées de transport solide ;
- gradins dont les girones sont protégés par une galette en béton en « contre-pente » ;
- gradins équipés à leur nez d'un « contre-seuil » en gabion semelle.

Sur les déversoirs de surface, les écoulements d'eau sont caractérisés par des vitesses rapides. La force gravitaire est prépondérante sur les autres forces extérieures et on adopte la similitude de Froude. Tous les résultats seront donnés à l'échelle réelle.

L'instrumentation

Les charges spécifiques en pied de déversoir sont mesurées à l'aide d'une rampe de Pitot, c'est-à-dire d'une série de tubes de Pitot répartis tous le long d'une section transversale et couplés à un même tube de lecture. Cette rampe, réalisée au moyen d'un tube de cuivre percé de petits orifices ouverts face aux lignes de courant, intègre la charge spécifique (H_s) sur une section du déversoir. Contrairement à un tube de Pitot qui enregistrerait toutes les fluctuations de l'écoulement en un point précis de la section, la rampe de Pitot offre une lecture stable de H_s . Un étalonnage précis de la rampe a donné entre 6 et 10 % d'erreur par défaut selon le débit ; les résultats expérimentaux ont été alors majorés en conséquence.

Le débit alimentant le canal vitré est mesuré par un déversoir triangulaire normalisé à mince paroi. Des

jaugeages volumétriques ont montré moins de 3 % d'erreur sur le débit.

Méthodologie de l'expérimentation

La charge initiale totale de l'écoulement au-dessus du seuil (E_0) est calculée dans la section critique à partir du débit :

$$E_0 = H + 3/2 Y_c$$

avec

H : hauteur du déversoir

Y_c : tirant d'eau critique ; $Y_c = (q^2/2g)^{1/3}$, q étant le débit par unité de longueur de seuil en m³.s⁻¹.ml⁻¹.

La charge résiduelle (E_1) au pied du déversoir (à l'entrée du bassin de dissipation en amont du ressaut) est mesurée au moyen de la rampe de Pitot. On calcule alors la perte de charge $E_0 - E_1$.

Écoulements sur les gradins

L'expérimentation a mis en évidence deux types d'écoulements : les écoulements en nappe et les écoulements très turbulents.

Les écoulements en nappe (nappe flow)

Les écoulements en nappe sont observés pour les petits à moyens débits. La lame d'eau déversante frappe le giron de la marche inférieure, d'abord totalement puis partiellement, et on parle alors respectivement de *nappe isolée* et de *nappe partielle*.

Écoulements en nappe isolée

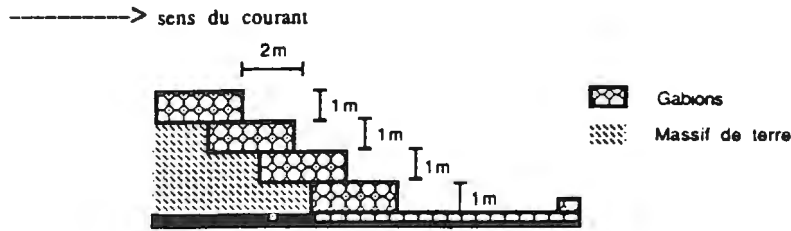
Deux régimes hydrauliques sont alors possibles : un premier caractérisé par une alternance des régimes fluvial et torrentiel, et un second totalement torrentiel.

a) *Alternance des régimes fluvial et torrentiel* : un ressaut hydraulique s'amorce en aval immédiat de l'impact de la lame déversante. Cet écoulement n'a été observé qu'avec une contre-pente ou un contre-seuil et pour de faibles débits (inférieurs à 1 m³.s⁻¹.ml⁻¹).

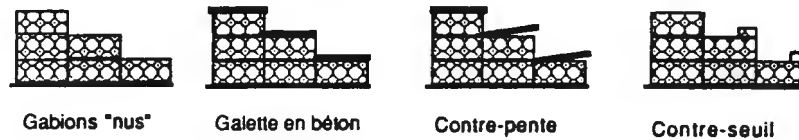
Une modélisation simple peut être proposée dans ce seul cas et donne de bons résultats en regard de nos expériences (fig. 3) :

- au point d'impact de la lame déversante, l'écoulement prend un tirant d'eau minimal Y_1 . Sous la lame déversante au pied de la marche apparaît un coussin d'eau de tirant d'eau Y_p ;
- le ressaut s'amorce dans la section 1 ;
- en aval immédiat du ressaut dans la section 2, l'écoulement devient fluvial et prend le tirant d'eau Y_2 ;
- entre la section 2 et la section 3, l'écoulement acquiert de la vitesse du fait de la chute et redevient torrentiel avec passage par le tirant d'eau critique Y_c dans la section 3.

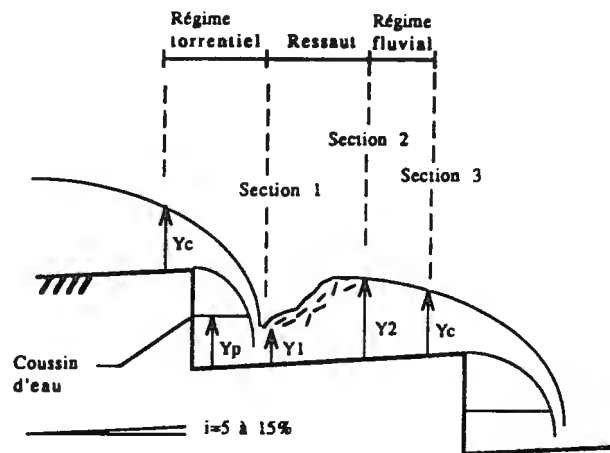
Les conditions hydrauliques sont identiques d'un gradin à un autre ; l'écoulement dissipe alors, à chaque marche, une énergie équivalente à une hauteur de



1. Exemple de parement aval en gradins de gabions, de 4 m de hauteur et de pente 1/2 ; au pied du déversoir, le bassin de dissipation gabionné.



2. Les différents profils de gradins testés.



3. Ecoulement en nappe isolée avec alternance de régimes fluvial et torrentiel.

marche. Par suite, on peut proposer une formule de perte d'énergie sur les déversoirs en escalier et pour des écoulements en nappe isolée :

— énergie sur la crête du déversoir :

$E_0 = n \cdot h + 3/2 Y_c$ avec un déversoir de n marches de h mètres de hauteur chacune ($nh = H$).

— énergie au pied du déversoir :

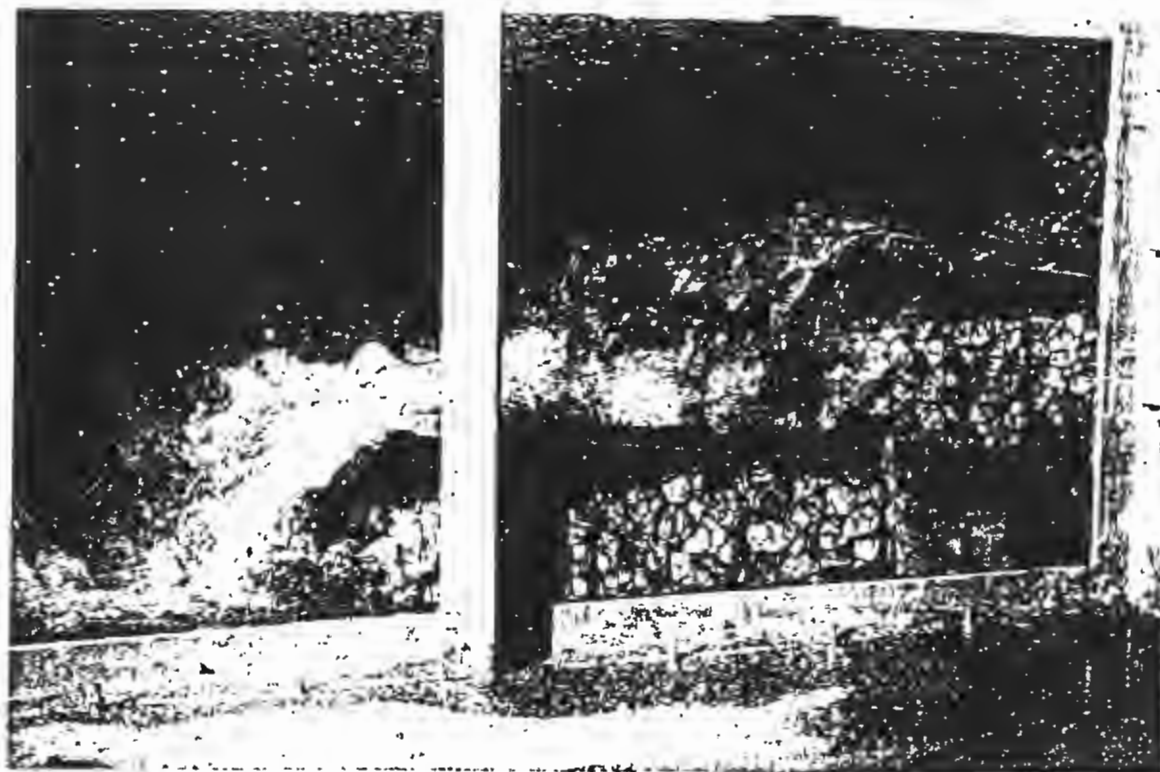
$$E_1 = Y_1 + V_1^2/2g$$

$$\Rightarrow E_0 - E_1 = n \cdot h + 3/2 Y_c - Y_1 - q^2/(2g \cdot Y_1^3) \quad (1)$$

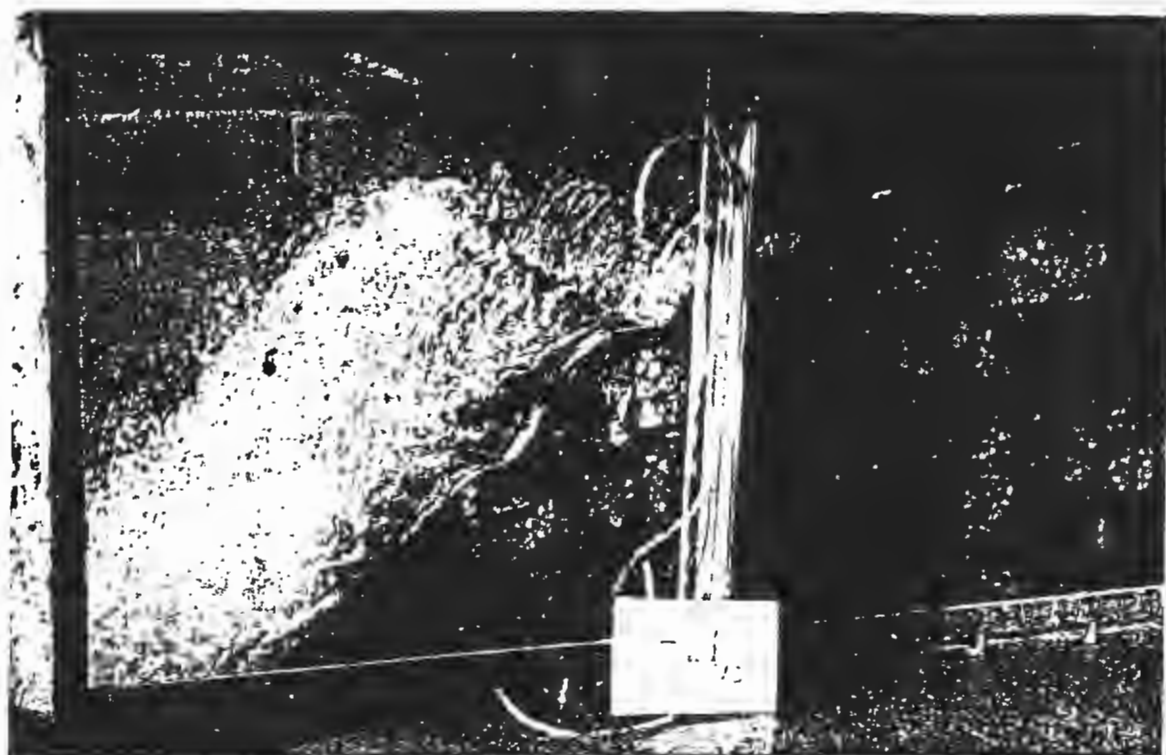
RAND a étudié l'hydraulique d'une chute d'eau sur une marche bétonnée de h mètres de hauteur ; il propose un système d'équations empiriques définissant les différents paramètres : [7]

$$\begin{aligned} Y_1/h &= 0,54 \cdot (q^2/(g \cdot h^3))^{0,425} \\ Y_2/h &= 1,66 \cdot (q^2/(g \cdot h^3))^{0,27} \\ Y_p/h &= (q^2/(g \cdot h^3))^{0,22} \end{aligned} \quad (2)$$

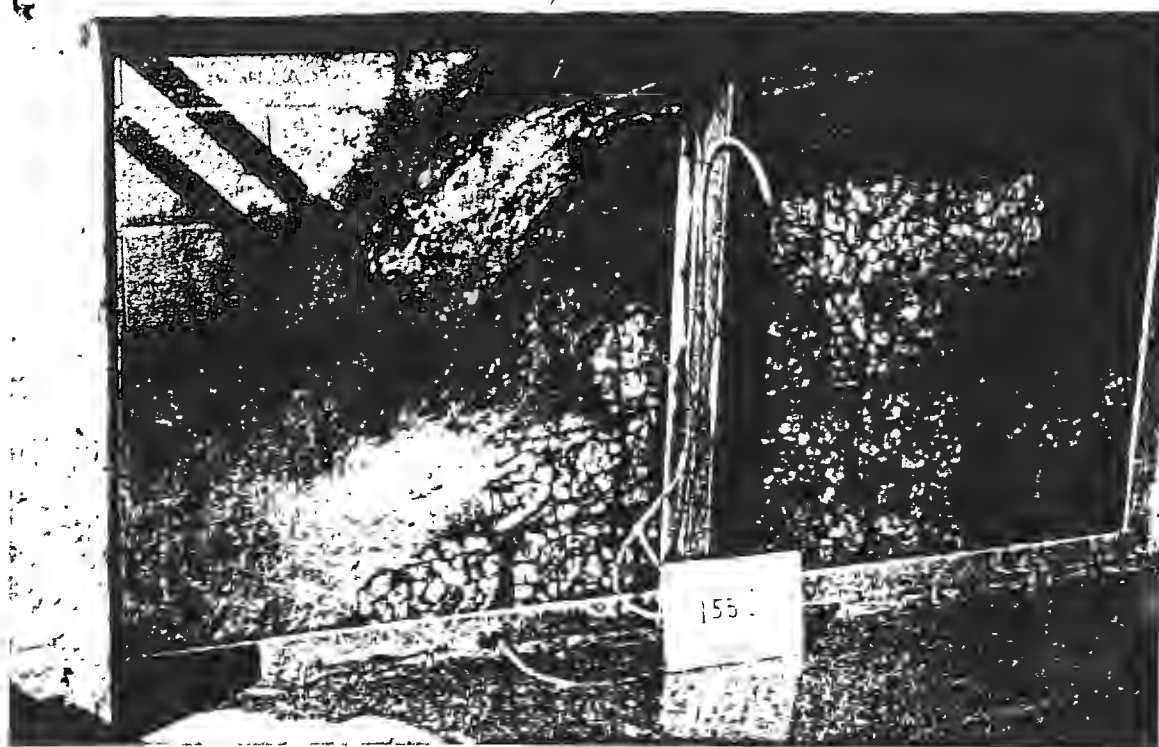
q étant le débit en $m^3 \cdot s^{-1} \cdot ml^{-1}$ de la lame d'eau et (Y_1, Y_2, Y_p) les tirants d'eau définis ci-dessus.



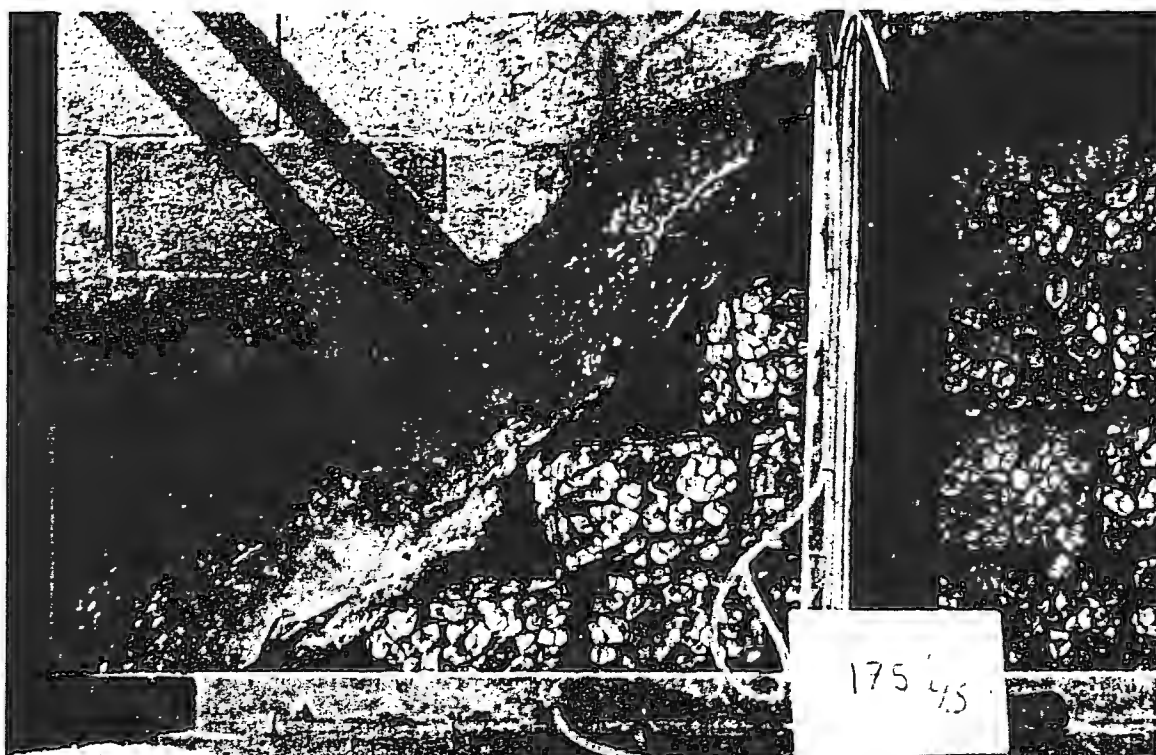
Ecoulement en nappe isolée sur un déversoir de pente 1/3 et de 4 m de hauteur ; gradins équipés d'une contre-pente ; alternance des régimes fluvial et torrentiel ; débit $0,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.



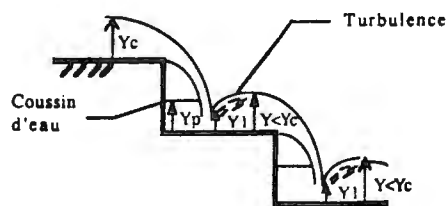
Ecoulement en nappe isolée sur un déversoir de pente 1/1 et de 5 m de hauteur ; gradins protégés par une galette en béton ; régime torrentiel ; débit $1,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.



Écoulement très turbulent sur un déversoir de pente 1/1 et de 5 m de hauteur ; gradins en gabions « nus » ; régime torrentiel ; débit $2,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.



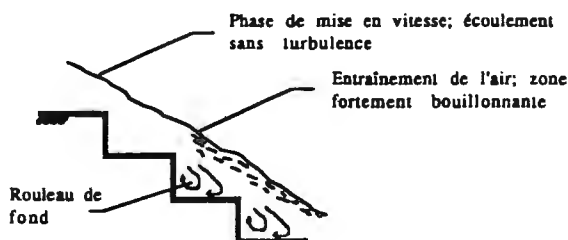
Écoulement très turbulent sur un déversoir de pente 1/1 et de 5 m de hauteur ; gradins en gabions « nus » ; régime torrentiel ; débit $2,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$.



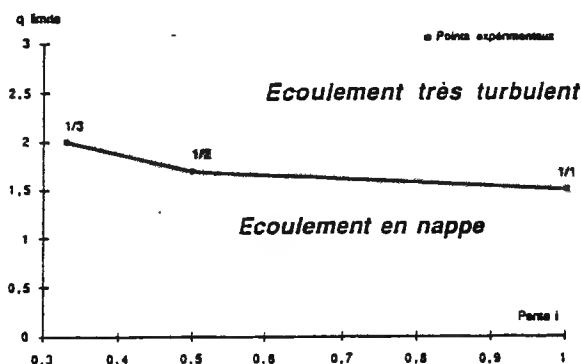
4. Ecoulement en nappe isolée avec régime constamment torrentiel.



5. Ecoulement en nappe partielle.



6. Ecoulement très turbulent.



7. Débit unitaire limite q (m³/s/ml) entre les écoulements en nappe et les écoulements très turbulents, en fonction de la pente i (m/m) pour des déversoirs en gradins de gabions « nus ».

La combinaison des équations (1) et (2) permet de calculer la perte de charge sur les déversoirs en escalier et on peut vérifier la validité de ces formules pour des structures en gradins de gabions en prenant $h = 1$ m. Les résultats de nos expériences, concernant les écoulements en nappe isolée mais aussi l'ensemble des écoulements en nappe, sont proches des résultats obtenus avec la modélisation : la dissipation réelle est au maximum 10 % supérieure à la dissipation calculée à partir de la modélisation. Cette différence entre l'expérimentation et la modélisation s'explique car certains paramètres comme les infiltrations dans les gabions, les différences de rugosité entre le gabion et le béton ou encore la pente du déversoir, ne sont pas considérés dans la modélisation.

b) *Régime torrentiel* : En absence de contre-seuil ou de contre-pente, la vitesse de l'eau reste forte et le ressaut hydraulique est chassé en aval de la marche. On observe un fort bouillonnement en aval de la zone d'impact de la lame déversante, mais l'écoulement reste torrentiel tout le long du déversoir (fig. 4).

Les écoulements en nappe sur les gradins horizontaux (profils « gabions nus » et « galette en béton ») sont systématiquement en régime torrentiel. Sur les déversoirs équipés d'une contre-pente ou d'un contre-seuil, le régime devient torrentiel à partir d'un certain débit.

Écoulements en nappe partielle

La lame déversante frappe pour partie le giron de la marche inférieure et l'éclatement des jets à chaque gradin provoque un fort bouillonnement. Le régime reste torrentiel tout le long des gradins (fig. 5).

Dissipation des écoulements en nappe

La dissipation de l'énergie des écoulements en nappe se réalise en deux phases : lors du choc de la lame sur la marche, puis essentiellement dans la zone de bouillonnement qui suit l'éclatement du jet, avec ou sans formation d'un ressaut.

On peut évaluer dans une première approche la dissipation de l'énergie sur les déversoirs en gradins de gabions en extrapolant la modélisation des écoulements en nappe isolée à l'ensemble des écoulements en nappe. Nos résultats ont montré que cette extrapolation à partir des formules (1) et (2) est valide à 10 % près.

Les écoulements très turbulents (skimming flow)

Ils sont observés pour les moyens à forts débits ; on ne peut plus distinguer alors de lame d'eau et le déversoir est totalement immergé dans un courant fort et relativement lissé.

D'amont en aval, on peut distinguer deux zones (fig. 6) :

- une première zone transitoire sur les deux premiers gradins : l'écoulement s'accélère jusqu'à atteindre une vitesse limite maximale V_{max} où les phénomènes d'entraînement de l'air apparaissent ; l'écoulement ne présente pas de bouillonnement dans cette phase de mise en vitesse et la surface libre du courant forme une ondulation lisse au-dessus du déversoir ;
- l'écoulement a atteint la vitesse V_{max} d'apparition de l'entraînement de l'air. Les particules d'air se mêlent

alors au courant d'eau et un bouillonnement intense se prolonge en s'amplifiant jusqu'au pied du déversoir. Le coussin d'eau au pied des gradins a laissé place à un rouleau de fond dans lequel on aperçoit la rotation de bulles d'air entraînées ; le courant se déplace le long du déversoir, s'appuyant sur le rouleau de fond d'une part et sur le nez des marches d'autre part.

La vitesse d'apparition de l'entraînement de l'air ne dépend que des caractéristiques du déversoir, en particulier de la hauteur des marches (ici $h = 1$ m) et de la longueur des girons. Quel que soit le débit de la crue simulée (jusqu'à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$), nous avons mesuré $V_{\max}$ de l'ordre de 5,5 à 6 m/s selon la pente du déversoir. Une fois $V_{\max}$ atteint, on note une légère diminution de la vitesse de l'eau ; outre une perte de h mètres d'énergie potentielle par gradin, l'écoulement dissipe aussi une partie de son énergie cinétique.

RAJARATNAM propose une modélisation des écoulements très turbulents sur la base d'expérimentations menées par SORENSEN [6], [8]

Limites entre écoulements en nappe et écoulements très turbulents

Les écoulements très turbulents apparaissent pour des débits plus élevés que les écoulements en nappe. Bien entendu, les caractéristiques géométriques des gradins interviennent dans l'initialisation de l'entraînement de l'air : une pente forte et des gradins horizontaux favorisent les écoulements très turbulents. La figure 7 présente les limites entre les deux régimes d'écoulements.

Dissipation de l'énergie sur les déversoirs en gradins de gabions

Présentation adimensionnelle des résultats

Les paramètres régissant les écoulements sur les gradins de gabions sont :

- la pente i et la hauteur H du déversoir, qui définissent totalement la géométrie du parement aval (H mètres équivalent à H gradins) ;
- le profil du gradin, avec la présence ou non de contre-seuil ou de contre-pente ; dans un premier temps, nous nous limiterons aux gradins de gabions « nus » avec des girons horizontaux.
- le débit par unité de longueur, qui régit, avec la pente i , le type d'écoulement (en nappe ou très turbulent).
- la force gravitaire prépondérante sur toutes les forces extérieures.

Quatre paramètres sont donc nécessaires, dans le cas des gradins de gabions « nus », pour exprimer complètement la variable adimensionnelle $(E_0 - E_1)/H$ (perte de charge par unité de hauteur du déversoir) :

$$(H_0 - E_1)/H = f(q, H, i, g)$$

On peut déterminer classiquement deux paramètres adimensionnels décrivant $(E_0 - E_1)/H$:

- le premier tout logiquement choisi est la pente de l'escalier : i
- le second fait intervenir q , H et g de façon comparable au carré du nombre de Froude :

$$q^2/(g \cdot H^3)$$

Ainsi, on peut écrire :

$$(E_0 - E_1)/H = f_1(i, q^2/(g \cdot H^3))$$

De la même façon, la variable adimensionnelle Y_1/H (tirant d'eau au pied du déversoir sur la hauteur du même déversoir) s'exprime :

$$Y_1/H = f_2(i, q^2/(g \cdot H^3))$$

A partir des résultats expérimentaux, nous avons tracé des abaques (fig. 8 et 9, page suiv.) donnant en ordonnée $Y_1 = (E_0 - E_1)/H$ et $Y_2 = Y_1/H$ en fonction de l'abscisse $X = q^2/(g \cdot H^3)$ et du paramètre i de la façon suivante :

— compte tenu que Y_1 et Y_2 tendent respectivement vers 1 et 0 lorsque X tend vers zéro, les courbes retenues sont de la forme

$$1/(1 - Y_1) = a_1 \cdot X^{b_1} \quad \text{et} \quad Y_2 = a_2 \cdot X^{b_2}$$

— on ajuste ces courbes aux nuages de points par la méthode des moindres carrés après transformation logarithmique.

Les coefficients ajustés sont donnés sur les tables I et II (page suiv.).

Domaine de validité des abaques

On se limite aux débits inférieurs à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$. Au-delà, des risques d'endommagements du déversoir sont à craindre (cf. section « déformations des gabions »).

Les abaques (fig. 8 et 9) prennent en compte les expériences conduites sur des déversoirs de 3, 4 et 5 m de hauteur. La représentation adimensionnelle permet d'extrapoler ces résultats. Nous préconisons néanmoins de se limiter à des hauteurs comprises entre 2 et 7 m car, pour des hauteurs plus importantes, on s'éloignerait par trop du domaine de nos expériences.

Bien entendu, on peut interpoler les résultats pour les déversoirs de pentes intermédiaires, comme par exemple 1/1,5 ou 1/2,5.

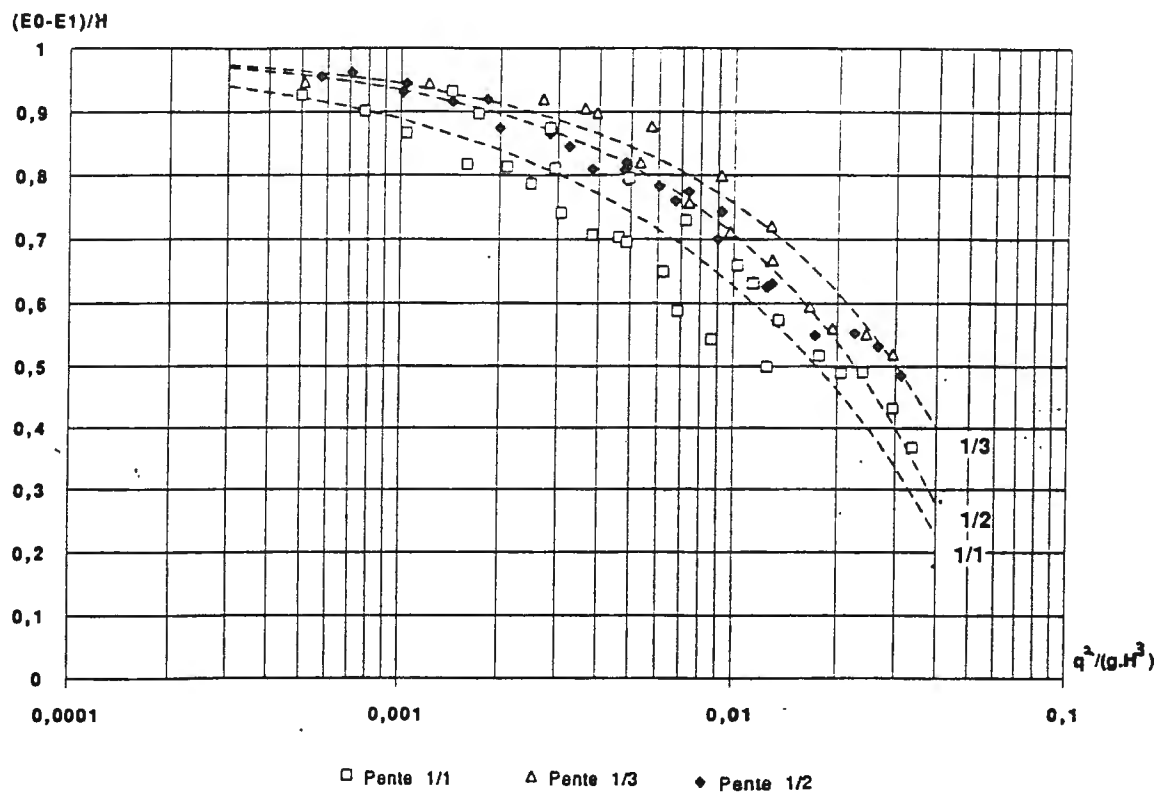
Méthodologie de dimensionnement du bassin de dissipation

Connaissant la géométrie du déversoir (pente, hauteur et longueur déversante) et la crue de projet, nos travaux permettent de déterminer le tirant d'eau Y_1 correspondant à des gradins de gabions « nus » (abaque fig. 9).

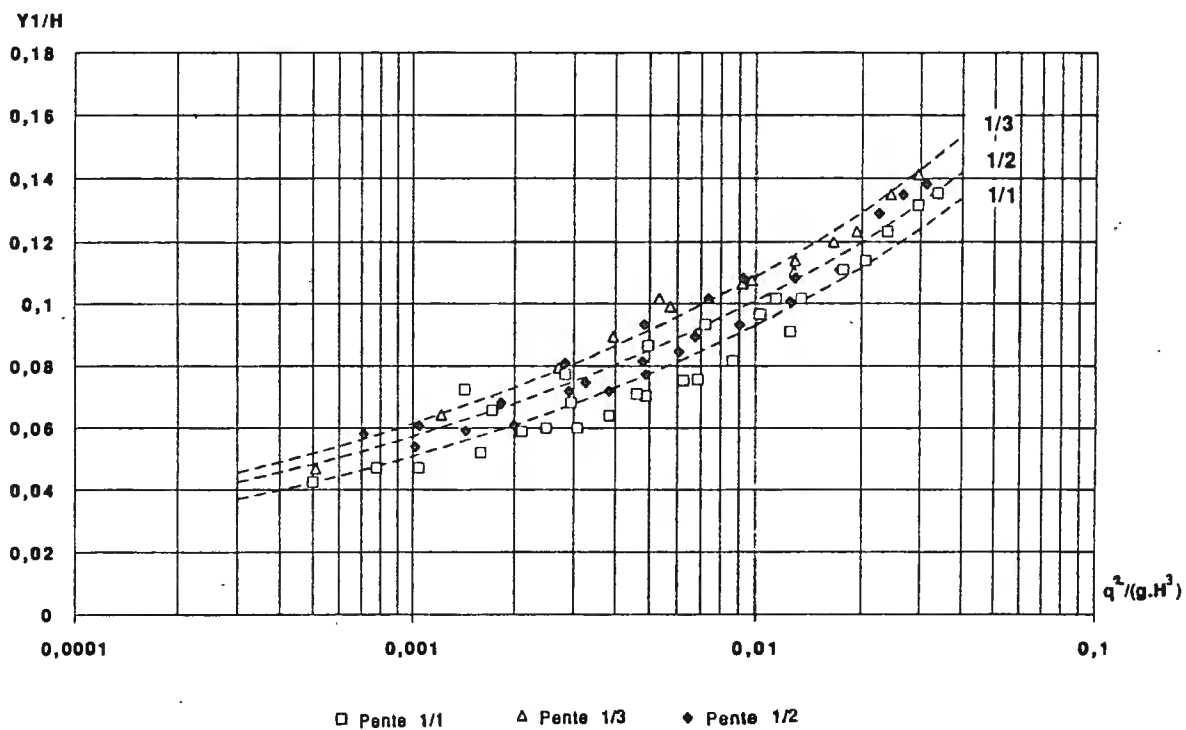
Pour dimensionner le bassin de dissipation, on calcule alors (fig. 10) :

- le nombre de Froude F_1 au pied du déversoir :

$$F_1 = q(g \cdot Y_1^3)^{1/2}$$



8. Perte de charge unitaire sur un déversoir en gradins de gabions « nus ».



9. Tirant d'eau Y_1 au pied d'un déversoir en gradins de gabions « nus ».

Table I

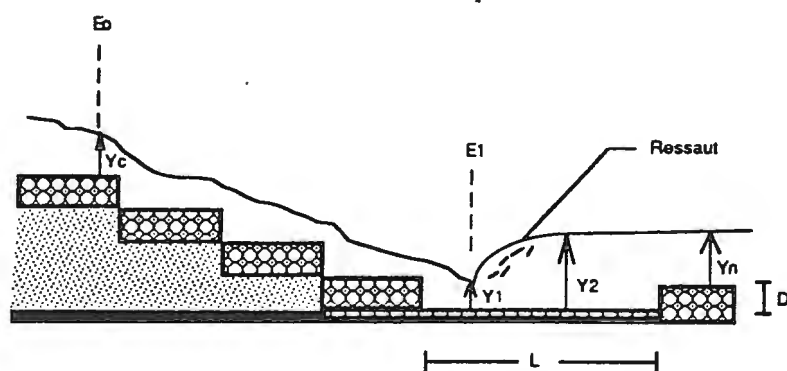
Relation entre $Y_1 = (E_0 - E_1)/H$ et $X = q^2/(g \cdot H^3)$ sous la forme $1/(1 - Y_1) = a_1 \cdot X^{b_1}$; coefficients a_1 et b_1 ajustés; coefficient de détermination r^2 .

		$\text{Ln } (a_1)$	b_1	r^2 (Coef. détermination)
Pente 1/3	(16 couples)	-1,568	-0,647	0,904
Pente 1/2	(25 couples)	-1,778	-0,654	0,964
Pente 1/1	(28 couples)	-1,434	-0,526	0,874

Table II

Relation entre $Y_2 = Y_1/H$ et $X = q^2/(g \cdot H^3)$ sous la forme $Y_2 = a_2 \cdot X^{b_2}$; coefficients a_2 et b_2 ajustés; coefficient de détermination r^2 .

		$\text{Ln } (a_2)$	b_2	r^2 (Coef. détermination)
Pente 1/3	(15 couples)	-1,074	0,248	0,974
Pente 1/2	(24 couples)	-1,157	0,247	0,941
Pente 1/1	(28 couples)	-1,163	0,263	0,888



10. Dimensionnement du bassin de dissipation.

— le tirant d'eau conjugué Y_2 en fin de ressaut :

$$Y_2 = 0,5 \cdot Y_1 \cdot [(1 + 8 \cdot F^2)^{1/2} - 1]$$

— la longueur L du bassin de dissipation par la formule empirique [11] : $L = 6 Y_2$

— la profondeur D du bassin de dissipation permettant d'atteindre le tirant d'eau normal Y_n de la rivière ; Y_n ne dépend que des conditions aval :

$$D = Y_n - Y_1$$

Le type de gradin modifie la dissipation de l'énergie :

— les galettes en béton coulées sur le giron des marches étanchent partiellement le déversoir et la dissipation est moindre ; pour dimensionner alors exactement la fosse de dissipation, l'expérience montre que la longueur L , calculée par la méthode ci-dessus décrite correspondant aux gradins en gabions « nus », doit être majorée respectivement de 15 %, 8 % et 0 % pour les pentes 1/3, 1/2 et 1/1.

— les contre-pentes et les contre-seuils créent des poches d'eau qui amortissent les lames déversantes et induisent la formation de ressauts hydrauliques ; la dissipation de l'énergie est donc améliorée. Selon la pente du déversoir, le bassin de dissipation est susceptible d'être raccourci jusqu'à 10 % [5].

Discussion

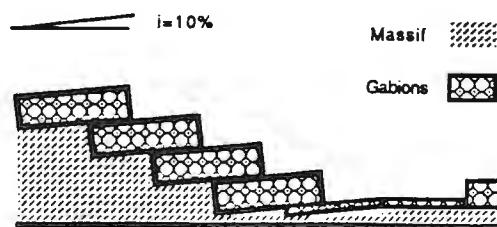
La perte de charge par unité de hauteur $(E_0 - E_1)/H$ décroît fortement lorsque $q^2/(g \cdot H^3)$ croît et donc, à hauteur H constante, lorsque le débit augmente. Ce phénomène s'explique par le changement de régime (passage de l'écoulement en nappe à l'écoulement très turbulent) qui se produit quand $q^2/(g \cdot H^3)$ augmente. La dissipation de l'énergie des écoulements très turbulents est nettement inférieure à celle qui se réalise lors des écoulements en nappe.

On note également que les courbes des variables $(E_0 - E_1)/H$ et Y_1/H correspondant aux différentes pentes ont tendance respectivement à se confondre lorsque $q^2/(g \cdot H^3)$, et donc q , diminue. En effet comme il est décrit dans la modélisation des écoulements en nappe isolée, on retrouve alors les mêmes conditions hydrauliques d'un gradin à un autre, et ce indépendamment de la pente du déversoir.

Déformations des gabions

Les expériences sur modèles réduits ont mis en évidence certaines déformations des gabions constituant le déversoir. Ces derniers sont sensibles au déplacement de leurs matériaux de remplissage. Il est primordial d'apporter un soin particulier à leur réalisation, ainsi qu'il est décrit dans [2] :

- qualité et agencement des pierres à la partie supérieure de ces gabions ;
- strict respect des règles de granulométrie (dimension des matériaux supérieure à 1,5 fois la maille).



11. Déversoir en contre-pente.

Si les gabions sont exposés à de fortes crues (supérieures à $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$), on renforce alors les grillages et les ligatures. On conseille également de rigidifier la cage métallique des gabions en disposant une troisième rangée de tirants supplémentaires et en augmentant le nombre de diaphragmes dans les gabions.

Les gabions sont sensibles au transport de matériaux solides, qui risquent de provoquer l'abrasion voire même la rupture du grillage. Le cas échéant, on protège le giron des gradins en coulant une galette en béton de 5 à 10 cm.

On peut donner une contre-pente aux gabions, tout simplement en inclinant vers l'amont l'ensemble du déversoir (fig. 11). Les giron des marches peuvent dans ce cas également être protégés par une galette en béton.

Outre une excellente dissipation de l'énergie, cette structure augmente la stabilité de l'ouvrage. Elle requiert néanmoins une plus grande technicité pour la mise en œuvre des gabions inclinés.

Conclusion

Si toutefois les règles de mise en œuvre des gabions sont respectées, les déversoirs à parement aval en gradins de gabions peuvent supporter sans préjudice notable des crues jusqu'à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$. C'est indubitablement la seule structure déversante gabionnée capable de supporter de telles crues ; en revanche, les parements aval en pentes inclinées gabionnées n'admettent pas des débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$ [2], [5].

D'autre part, les déversoirs en gradins offrent une pré-dissipation de l'énergie importante avant le bassin de dissipation. Cette étude permet de quantifier précisément cette dissipation sur les gradins et les paramètres qui définissent le bassin.

Les résultats finaux conduisent à une économie de 10 à 30 % sur la longueur du bassin de dissipation par rapport aux longueurs obtenues avec les méthodologies jusqu'à présent utilisées. Connaissant le coût de l'évacuateur de crue sur ce type de barrage, l'intérêt économique se situe entre 5 et 10 % sur l'ensemble du projet.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Société du Canal de Provence pour la qualité des moyens de travail qui nous a été offerte pendant l'expérimentation.

ANNEXES

1. Unités

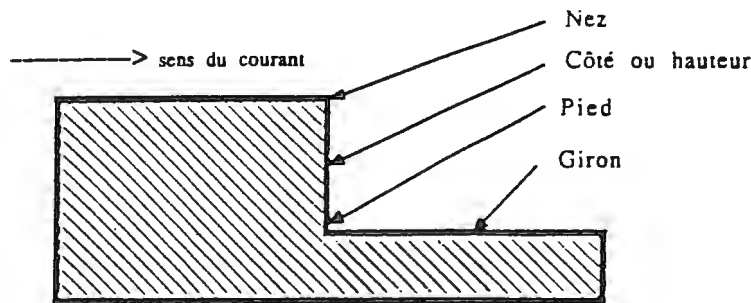
ml	mètre linéaire
$m^3.s^{-1}.ml^{-1}$	débit par unité de longueur de seuil
m/m	pente du déversoir

2. Notations

Y_c	Tirant d'eau critique
Y_1	Tirant d'eau au pied du déversoir
Y_2	Tirant d'eau conjugué à Y_1 en aval du ressaut

Y_p	Tirant d'eau du coussin d'eau sous la lame déversante
E_0	Charge totale de l'écoulement sur le seuil du déversoir
E_1	Charge totale de l'écoulement au pied du déversoir
q	Débit par unité de longueur de seuil
g	Accélération de la gravité
H	Hauteur du déversoir
h	Hauteur d'un gradin
n	Nombre de gradins du déversoir
i	Pente du déversoir
V_m	Vitesse de l'écoulement dans la section m
H_s	Charge spécifique : $H_s = Y + V^2/2g$

3. Terminologie relative aux gradins



Bibliographie

- [1] AGOSTINI (R.), BIZZARI (A.), MASETTI (M.): *Ouvrages flexibles pour tronçons torrentiels et fluviaux (1^{re} partie: Ouvrages transversaux)*. Ed. France Gabions s.a., Le Pouzin, 1987.
- [2] CEMAGREF: *Les ouvrages en gabions*. En cours d'édition par le Ministère Français de la Coopération et du Développement (*Edition précédente: Collection Techniques Rurales en Afrique*, Ed. Eyrolles, Paris, 1974).
- [3] DURAND (J.-M.): *Etude de variantes techniques dans la conception des petits barrages en terre au Burkina Faso*. Ed. CEMAGREF groupement d'Aix-en-Provence, Le Tholonet, mai 1989.
- [4] ESSERY (S.), HORNER (W.): *The hydraulic design of stepped spillways (CIRIA Report 33)*. Ed. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), Londres, janvier 1978.
- [5] PEYRAS (L.): *Etude de la dissipation de l'énergie sur les déversoirs en gradins de gabions*. Ed. CEMAGREF groupement d'Aix-en-Provence, Le Tholonet, mai 1990.
- [6] RAJARATNAM (N.): Skimming flow in stepped spillways. *J. hydraul. eng., ASCE*, vol. 116, n°4, avril 1990, pp. 587-591.
- [7] RAND (W.): Flow geometry at straight drop spillways. *Proc. ASCE*, 81 E, Paper 791, septembre 1955, pp. 1-13.
- [8] SORENSEN (R. M.): Stepped spillway hydraulic model investigation. *J. hydraul. eng., ASCE*, vol. 111, n°12, décembre 1985, pp. 1461-1472.
- [9] STEPHENSON (D.): Gabion energy dissipators. *Treizième congrès des grands barrages*, New-Delhi, 1979. Ed. Commission Internationale des Grands Barrages, Q. 50, R. 3, pp. 33-43, 1979.
- [10] STEPHENSON (D.): *Rockfill in hydraulic engineering*. Ed. Elsevier scientific publishing company, Collection Developments in geotechnical engineering, vol. 27, Amsterdam, Oxford, New York, 1979.
- [11] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (Bureau of Reclamation). *Design of small dams*. Ed. Water Resources Technical Publication (United States Government Printing Office), Denver, 1987.