

EVACUATEURS DE SURFACE

SURFACE SPILLWAYS

Pierre JEHANNO, Jean-Paul HURAUT & Jean-Claude CARRE

SOGREAH Ingénierie

6, rue de Lorraine – 38130 ECHIROLLES, France

Cet article aborde principalement les points suivants :

- *Le retour d'expérience (au sens large) sur des ouvrages existants,*
- *Les limites des conceptions « standard » ou normalisées,*
- *Quelques problèmes propres aux bassins à ressaut et fosses de dissipation (« plunge pools »),*
- *Quelques problèmes posés par les évacuateurs de basses et moyennes chutes (chutes inférieures à 35 m environ),*
- *Les limites de la modélisation physique ou numérique,*
- *Quelques éléments particuliers sur la conception des évacuateurs,*
- *Quelques pistes ou idées parfois pas nouvelles mais qu'il est peut être bon de rappeler.*

Une analyse des taux de dissipation (Kw/m^3) des bassins à ressaut et fosses de dissipation est présentée.

Cet article est illustré par des exemples de solutions particulières d'évacuateurs (réalisés) étudiés par SOGREAH. La plupart des exemples présentés ont fait l'objet d'essais sur modèles réduits.

The main subjects discussed in this article are as follows:

- *lessons learned (in the broad sense) from existing structures,*
- *the limits of "standard" designs,*
- *specific problems related to hydraulic jump dissipators and plunge pools,*
- *problems posed by low- and medium-head spillways (heads lower than about 35 m),*
- *the limits of scale or numerical modelling,*
- *a few points concerning spillway design,*
- *a few ideas that are not necessarily new but can be usefully recalled.*

An analysis of dissipation rates (kW/m^3) of hydraulic jump dissipators and plunge pools is presented.

This article is illustrated using examples of specific (built) spillway solutions designed by Sogreah. Most of the examples presented were subjected to scale model testing.

I INTRODUCTION ET OBJET DE L'ARTICLE

Cet article traite des sujets suivants, dans le cadre du thème 1 du colloque :

- Le retour d'expérience sur quelques ouvrages existants,
- Les limites des conceptions « standard » et/ou normalisées,
- Quelques éléments sur la conception des évacuateurs,
- Quelques pistes ou idées parfois bien connues mais qu'il est bon de rappeler.
- Et enfin la présentation de solutions particulières pour un certain nombre d'évacuateurs étudiés par SOGREAH, certains en collaboration avec d'autres sociétés ou administrations des pays concernés.

II GENERALITES SUR LES OUVRAGES D'EVACUATION DES CRUES ET LEUR CONCEPTION

II.1 Types d'évacuateurs

On peut citer en général les types d'évacuateurs suivants :

- Evacuateurs à seuil profilé (« ogee spillway », ex : Creager),
- Evacuateurs latéraux (avec « auge » associée),
- Evacuateurs à marches,
- Evacuateurs en tulipe (« shaft spillway »)⁽¹⁾,
- Evacuateurs en siphons⁽¹⁾,
- Evacuateurs équipés d'hausses Hydroplus ®
- Evacuateurs équipés de seuils gonflables,
- Evacuateurs en labyrinthes,
- Evacuateurs en touches piano
- Dignes fusibles,
- Evacuateurs en col,
- Evacuateur en puits à vortex (*).

II.2 Types de liaison évacuateur-dissipateur

II.2.1 Coursiers

Les coursiers peuvent être :

- A marche, déversoir en gradins des barrages BCR,
- Lisse (ex : Barrage d'Er Mel, en Tunisie, mis en service en 1997),
- Excavé dans le rocher (ex : barrage d'El Breck, en Tunisie, mis en service en 2003),
- Cascades excavés dans le rocher et non revêtues (La Grande 2).

II.2.2 Déversoirs

Les déversoirs installés en crête de barrages minces ne sont pas nécessairement suivis de coursiers, l'eau s'écoulant alors directement en chute libre dans un bassin de dissipation, bétonné ou non.

II.3 Dissipation d'énergie

On peut citer les principaux dispositifs suivants :

- Bassins à ressaut (ex : Er Mel/ Tunisie, Salto Grande/Brésil, Jupia/ Brésil, Nam Leuk,/Laos),
- Fosse de dissipation revêtues (ex : Vouglans/ France, aménagements sur l'Orange River/ RSA),
- Fosse de dissipation non revêtues (ex : Kariba/ Zimbabwe, Turkwel/ Kenya, Tucurui/ Brésil, Katse/ Lesotho)
- Dissipation sur le lit naturel/rocher (ex : Song Loulou/Cameroun, Paulo Afonso/Brésil, El Breck/ Tunisie),

II.4 Conception dite « standard »

On fait référence ici à des documents reconnus internationalement ou en France, par exemple les ouvrages suivants :

- « hydraulic design of spillways » (USBR),
- « hydraulic design of stilling basins and energy dissipators » (USBR),
- « hydraulic design of outlets works » (USBR),
- « hydraulic design criteria », USACE,
- bulletins CIGB,
- recommandations françaises (exemple : « petit barrages », Degoutte, Cemagref éditions).

⁽¹⁾ Cités pour mémoire car ces évacuateurs sont partiellement à surface libre, suivant les conditions d'écoulement.

II.5 Limites des conceptions standard/normalisées

La conception des ouvrages d'évacuations amènent souvent soit à s'écarter de standards ou de solutions conventionnelles, soit à faire une conception « sur mesure », en particulier pour les points ou raisons suivantes :

- une conception standard amène parfois à des coûts prohibitifs,
- il n'est pas toujours possible d'appliquer une conception standard, notamment dans les cas suivants :
 - coursiers divergents, convergents ou courbes,
 - déversoirs particuliers,
 - coursiers multiples débouchant dans/sur le même ouvrage de dissipation,
 - bassins de dissipation trop longs ou trop profonds (donc d'un coût excessif),
 - inexistence de standard pour certains types d'évacuateurs (exemple : Splitters dits « Colonel Robert », dissipation sur évacuateurs en BCR⁽²⁾,
- formation des fosses de dissipation non revêtues,
- conception des fosses de dissipation revêtues.

II.6 Problèmes posés par les évacuateurs de basses et moyennes chutes

Pour des basses à moyennes chutes (approximativement et comme ordre de grandeur : chute maximale : 35 m⁽³⁾), si l'on ne peut dissiper l'énergie de la crue sur le rocher (matériau en aval friable ou peu résistant aux fortes vitesses⁽⁴⁾), la chute n'est pas toujours suffisante pour envoyer le ou les jets loin du barrage.

Un bassin de dissipation de type bassin à ressaut est alors parfois nécessaire. Son coût est souvent très élevé et ce type d'ouvrage pose un certain nombre de problèmes (cavitation, sous-pression, drainage, circulation des matériaux piégés dans le ressaut et usure associée). Enfin, les bassins à ressaut sont très tributaires du niveau aval, ce qui est une difficulté car la connaissance de cette loi est souvent très approximative, surtout si des abaissements de cette loi sont attendus, ce qui est la règle pour les rivières coulant sur leur propres sédiments en aval d'un barrage réservoir, en raison du déficit de transport sédimentaire résultant du piégeage des alluvions dans la retenue.

II.7 Problèmes posés par les modèles réduits à fond affouillable

Les érosions et fosses d'érosion (« plunge pools ») sont en général étudiées à l'aide de modèles réduits.

Cependant, dans le cas des fosses d'érosions, pendant le passage de l'écoulement, le matériau affouillable est en partie en pseudo suspension dans le bouillonnement de la fosse. Quand on arrête le modèle, ce matériau en suspension retombe dans la fosse qui s'est créée et comble en partie la fosse qui s'était formée (d'où sous estimation de l'affouillement réel car dans la réalité « nature », les blocs qui tourbillonnent dans la fosse finissent par se désagréger).

Quand on a affaire à du rocher fracturé mais ayant une certaine tenue, le matériau que l'on utilise sur modèle (en général de l'enrochement modélisé à l'échelle par du gravillon) a un talus d'équilibre très inférieur à celui du rocher « nature ».

On peut dans certains cas estimer ou observer la fosse d'érosion en cours d'écoulement :

- Pour le barrage de Turkwel (Kenya), on disposait d'une paroi rocheuse quasi verticale en rive droite, qui a été représenté sur le modèle (1/70) par du matériau transparent,
- Pour le barrage de Katse (Lesotho), L'étude a été effectuée à l'aide de 2 modèle (1/30 partiel et 1/70 général). Le modèle partiel représentait une tranche de l'évacuateur (2+2 ½ passes sur les 10 passes non vannées). Ce modèle a été équipé d'une grande paroi transparente permettant l'étude des 3 solutions préalablement retenues (voir § « barrage de Katse »).
- Pour le barrage d'Agoyan (Equateur), la présence de rocher fracturé mais relativement compact a amené à représenter ce matériau par un mélange ayant une cohésion permettant de représenter des talus raides après affouillement.

⁽²⁾ Cependant, les dernières publications (Ohtsu/2004, Chanson/2002) semblent permettre d'estimer la dissipation, y compris dans la zone intermédiaire avant le régime établi. Les auteurs n'ont pas encore analysé complètement toutes les informations disponibles sur ce sujet.

⁽³⁾ Cette valeur est à définir plus précisément suivant le projet (configuration du site, matériau en aval du barrage, débit spécifique de l'évacuateur ...).

⁽⁴⁾ Notion d'ailleurs souvent difficile à quantifier.

II.8 Problèmes posés par les bassins à ressaut

Comme indiqué plus haut, ce type d'ouvrage pose un certain nombre de problèmes (cavitation, sous-pression, drainage, re-circulation des matériaux piégés dans le ressaut et usure associée, évaluation du niveau aval dans le long terme).

La notion de longueur de ressaut (4 à 6 fois la hauteur conjuguée d'après la littérature classique) est un peu subjective. Elle dépend de la turbulence résiduelle et l'on pourrait envisager des bassins plus courts, à condition de disposer en aval de rocher sain ou d'y installer des protections supportant des vitesses élevées.

II.9 Limites des modèles réduits hydrauliques

On peut citer, entre autres les difficultés suivantes à prendre en compte pour une bonne interprétation des phénomènes observés dans les modèles réduits :

- la représentation de certains cas de transport solide,
- la représentation de matériau cohésif,
- la représentation du rocher en place (rocher fracturé ...),
- la représentation du diphasique (écoulement d'air et d'eau, notamment dans le cas des coursiers de hautes chutes)
- la prise en compte d'effet d'échelle (exemple : coursier trop rugueux sur modèle, entraînant une portée du jet plus courte sur le modèle que sur le prototype),
- représentativité des matériaux affouillables.

II.10 Limites et promesses des modèles mathématiques

On peut citer les quelques points suivants qui peuvent limiter ou au contraire faciliter l'extension des domaines d'utilisation des modèles mathématiques à la place des modèles physiques :

- représentation du transport solide et érosion (et dépôt en aval de fosse de dissipation), circulation des blocs piégés dans un bassin à ressaut, ...
- représentation des écoulements dysphasiques (eau & air),
- représentation des ondes de Mach,
- 3D sur forme complexe (ex : Splitters),
- pas de vision « full 3D » (on ne « voit » les simulations que sur un écran 2D, pas de vision en relief, du moins au niveau des logiciels industriels).

Nota : Certains points cités ci-dessus sont déjà partiellement résolus par des logiciels industriels.

II.11 Quelques pistes d'amélioration et/ou de conception

- bassin à ressaut : jouer sur pente et hauteur redan (pré dimensionnement : cf. Rand),
- bassin à ressaut plus court mais avec une protection renforcée en aval,
- Splitters (voir § « barrage de Katse »),
- Effets généraux de dents ou des cuillers (sur le coursier ou en fin de coursier),
- Evacuer sur une très grande largeur afin d'avoir un très faible débit spécifique (barrage de la Comoe/ Burkina Faso : évacuateur rustique sur latérite avec une faible hauteur d'eau équipé d'un seuil très sommaire permettant de fixer le niveau de déversement)
- Généraliser ou adapter le bassin à impact (USBR IV, SAF) pour les plus fortes chutes et débits.

II.12 Notion de taux de dissipation

A l'aval d'évacuateurs de moyenne et haute chute, on aménage parfois une fosse de dissipation soit dans la roche existante (« plunge pool »), soit dans une fosse/bassin bétonnée.

Tableau n°1 : Caractéristiques approximatives des fosses de 4 barrages

Aménagement	Q (m³/s)	q (m³/s/m)	Chute (m)	Profondeur (m)	Surface (m²)	P/V (Kw/m³)
Vouglans	1 650	48.5	98	25	3 500	23
P.K. Leroux	13 000	62	71	27	11 00	30
Cambambe	9500	150	60	25	4 000	56
Maguga	7 000	35	85	20	10 000	31

Bien que les valeurs du rapport P/V (puissance brute à dissiper/ volume du bassin) ne soient pas représentatives de phénomènes strictement similaires, car elles ne prennent pas en compte les caractéristiques du jet ou des lames d'eau (compact ou non, simple ou multiple, avec ou sans disperseur) ou leur caractéristiques géométriques, celles-ci sont indicatives et fournies à titre de comparaison.

On constate ici que l'on peut atteindre $P/V=56 \text{ kW/m}^3$.

Certains documents citent le chiffre de 60 kW/m^3 (80 CV/m^3) pour les aménagements hydroélectriques (sans doute pour des bassins bétonnés).

Sur un barrage en France, on est allé juste qu'à 130 kW/m^3 pour la sortie d'une vanne de fond (chute : 45 m). Les essais n'ont montré aucun dégât mais des incertitudes existent sur les performances réelles dans les conditions du site.

A titre indicatif, Les conditions maximales testées pour le bassin de type USBR VI (bassin de dissipation en sortie de conduite en pression) sont $6,24 \text{ m}^3/\text{s}$ et $11,3 \text{ m/s}$. On aboutit alors à un rapport P/V de $14,5 \text{ kW/m}^3$. Pour un bassin à ressaut aux conditions hydrauliques identiques, cette valeur aurait été de $6,1 \text{ kW/m}^3$ (hypothèse : longueur du bassin égale à 4 fois la hauteur conjuguée).

II.13 Volume approché d'un bassin à ressaut

Pour un pré dimensionnement rapide, la valeur du volume d'un bassin à ressaut peut être approchée par la valeur suivante :

$$\text{Volume du bassin (m}^3\text{)} = 8 \text{ à } 12 QV_1 / g \text{ (pour } F_1 > 3\text{)}$$

Avec :

- $Q \text{ (m}^3/\text{s)}$: Débit,
- $V_1 \text{ (m/s)}$: Vitesse à l'entrée du bassin (conditions torrentielles),
- $g \text{ (m/s}^2\text{)}$: Accélération de la pesanteur,
- F_1 : Nombre de Froude à l'entrée du bassin.

En effet, la hauteur conjuguée est donnée par la formule classique :

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

Avec :

- $Y_2 \text{ (m)}$: Hauteur conjuguée ($\leq$ hauteur d'eau aval naturelle),
- $Y_1 \text{ (m)}$: Hauteur d'eau à l'entrée du bassin,
- F_1 : Nombre de Froude à l'entrée du bassin.

Pour $F_1 > 3$, on peut simplifier l'expression (1) en $0.5 \times (8 F_1)^{0.5}$

La longueur du ressaut (L_r) est estimée à environ 4 à 6 Y_2 (voir références [12], [13] et [14]),

Le volume du ressaut vaut donc $4 \text{ à } 6 Y_2^2 \times B$, où B est la largeur du bassin.

En posant que $Q=B*Y_1*V_1$ et en remplaçant Y_2 et F_1 par leurs valeurs, on aboutit à la formule mentionnée ci-dessus.

III QUELQUES EXEMPLES D'EVACUATEURS DE SURFACE

III.1 Introduction

Il peut ici s'agir ici soit :

- de solutions originales,
- soit d'améliorations
 - de solutions dites « standard » ou normalisées (de type « hydraulic design criteria », USBR, USACE, recommandations françaises, ...),
 - de solutions reconnues (exemple : Splitters de type « colonel Robert ») mais non normalisées.

Ne sont cités ici que quelques exemples intéressants et non une liste exhaustive.

III.2 Barrage d'Agoyan

Barrage réalisé sur le rio Pastaza, en Equateur, mis en service en 1987.

Ce barrage a fait l'objet d'une étude sur modèle au 1/70.

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateurs (m ³ /s)	Chute (m)	Débit spécifique (m ³ /s/m)	Nombre de passe	Type de dissipation
43	6000 (4000+2000)	34	75 & 53	3 pertuis de surface vannées + 2 pertuis de fond	Fosse confinée Rocher fracturé

Compte tenu d'une fosse de dissipation assez confinée et de présence d'un rocher assez solide pour tenir avec des talus raides, on a été amené à représenter ce rocher et le matériau du lit par un mélange ayant une cohésion permettant de représenter des talus raides après affouillement

La mise au point du matériau « modèle » a nécessité une étude particulière (essais d'érosion en canal).

Ont été étudiés sur ce modèle au 1/70 :

- la dissipation d'énergie (avec dans certains cas les 5 pertuis ouverts),
- les déflecteurs (assez complexes) associés à la dissipation d'énergie,
- les chasses des sédiments de la retenue,
- les vortex de la prise d'eau.

III.3 Bassin à ressaut avec cuiller(s) de dispersion (disperseurs)

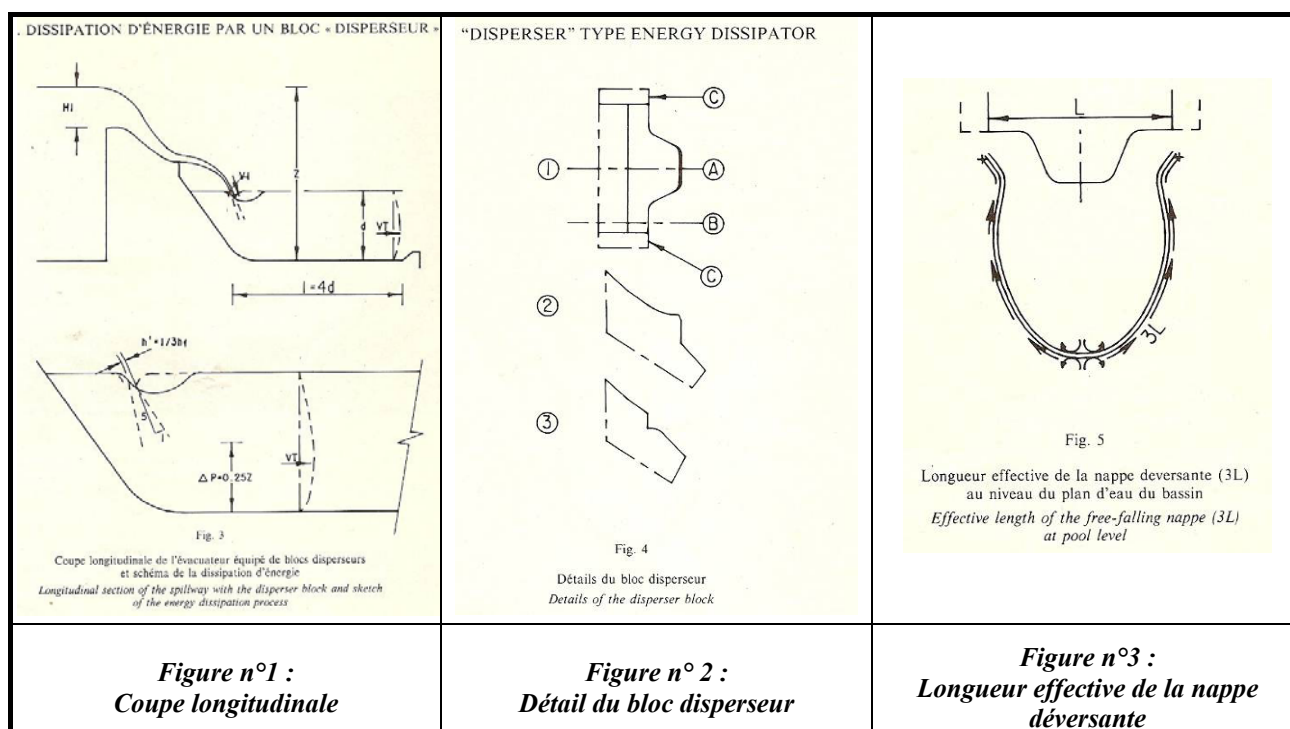
Ce dispositif a déjà fait l'objet d'une publication pour le CIGB (16^{ème} congrès, San Francisco, 1988).

Il s'agit de placer une ou plusieurs cuillers le long du coursier (toutes les cuillers étant à la même cote).

Le but de ces cuillers est de diviser l'écoulement en 2 directions :

- Hors des cuillers, l'écoulement le long du coursier, comme pour un bassin classique et arrive dans le bassin de manière horizontale. Seule la contre pression aval arrête (et dissipe) cet écoulement rapide
- L'écoulement sur les cuillers d'une part se disperse en cloche et d'autre part retombe dans le bassin avec une pente plus raide (au delà de 45°).

On comprend donc que ce dispositif utilise mieux le volume disponible pour dissiper l'énergie qu'un bassin classique qui reçoit à l'amont un jet compact et rapide.



(D'après S. Alam, Congrès CIGB 1988)

Ce dispositif a été comparé avec un bassin classique (sans blocs disperseurs).

Les résultats principaux sont les suivants :

- Réduction de 12% du volume du bassin,
- Affouillements aval 2 fois moins importants,
- Fluctuations de pression réduites de 50%,
- Plus de courant de retour à l'aval du bassin (courants qui entraînent des matériaux dans le bassin à ressaut classique),
- Aération du dispositif assurée.

Bien sûr, ce dispositif ne peut fonctionner que si l'on dispose d'une chute suffisante sur les cuillers de dispersion. En général, on admet que l'on ne peut changer la direction d'une lame d'eau que si la chute est supérieure à environ 4 fois l'épaisseur de la lame d'eau sur le seuil.

III.4 Barrage de Katse

Barrage réalisé sur la rivière Malibamatso, au Lesotho, mis en service en 1997.

Plusieurs variantes ont été envisagées pour cet évacuateur placé en crête d'un barrage voûte de 185 m de hauteur, depuis la variante initiale constituée d'un seuil déversoir réduit au minimum, nécessitant la construction d'un bassin de dissipation revêtu, une variante classique, du type "Colonel Roberts", (solution 2 ci-dessous) déjà utilisée sur les barrages sur la rivière Orange en Afrique du Sud, et au barrage de Victoria (Sri Lanka), et une solution originale, (solution 3 ci-dessous) avec un coursier assez long pour prendre suffisamment de vitesse et n'avoir sur les déflecteurs qu'une épaisseur d'eau relativement faible et facile à diriger.

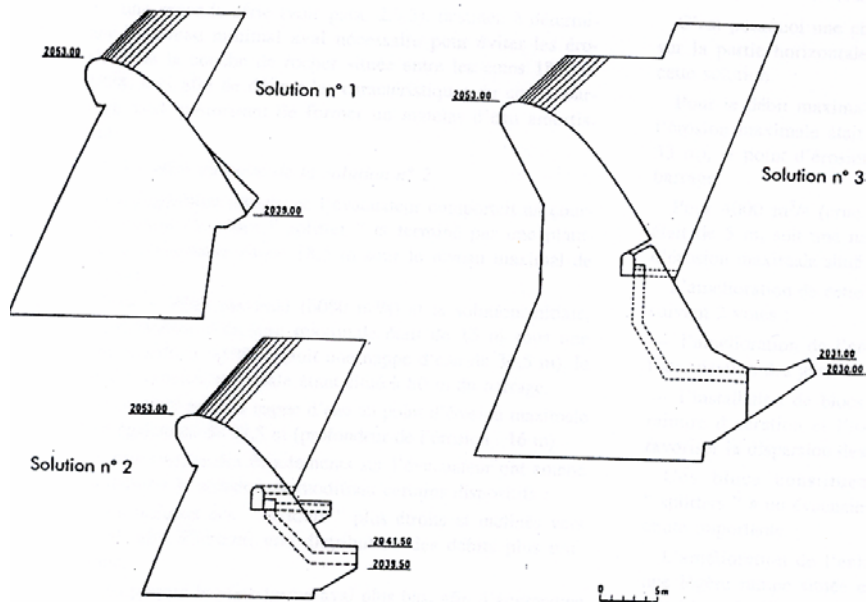


Figure n°4 : barrage de Katse : solutions retenues pour le coursier

Les solutions 2 et 3 ont fait l'objet d'études parallèles sur modèle réduit, Celles-ci ont montré un clair avantage de la solution 3, spécialement développée pour cet aménagement, par rapport à la solution 2, plus courte et plus classique, avec une réduction de la profondeur d'affouillement de l'ordre de 8 m pour la crue maximale à niveau aval équivalent.

III.5 Barrage de Nam Leuk

Barrage réalisé sur la rivière Nam Leuk, au Laos, mis en service en 2000.

L'évacuateur de cet ouvrage, construit sur la rivière Nam Leuk au Laos, avec un débit spécifique maximum de 36 m³/s/lm et une chute de 46 m, était à la limite des bassins USBR I et II.

Les essais sur modèle réduit ont montré le peu d'effet des "Chute blocks", mais l'importance de la pente du redan aval, pour lequel un adoucissement de la pente au-delà de 1/1 entraînait une dégradation de la stabilité du ressaut.

III.6 Barrage d'Er Mel

Barrage réalisé sur l'Oued Er Mel, en Tunisie, mis en service en 1997.

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateur (m ³ /s)	Chute (m) à Q max.	Débit spécifique (m ³ /s/m)	Nombre de passe	Type de dissipation
26,5	1600 (*)	20	40	1	Ressaut (bassin béton)

(*) : L'ouvrage est complété par une digue fusible.

Pour la conception du bassin, on s'est inspiré du bassin de type III, mais en y apportant les modifications suivantes :

- Pas de « chute blocks ». Les « chute blocks » sont d'un point de vue général mal placés vis à vis de la cavitation (car l'on a une fermeture des poches de cavitation due à la contre pression engendrée par le changement de direction de l'écoulement). De plus ils ne font pas écran à l'écoulement (comme le fait un bassin à impact type USBR VI) et dissipe donc peu d'énergie (voir § « barrage de Nam Leuk »),
- « Baffle blocks » de plus grande hauteur et plus proches de la rupture de pente⁽⁵⁾.

On a profité de la dépression à l'aval des « baffle blocks » pour y installer la sortie des drains permettant d'abaisser les pressions qui peuvent être présentes sous la dalle du bassin ou en in de coursier..

En effet, la sortie des drains pose toujours des problèmes au concepteur car si on les installe en fin du coursier, on se trouve juste dans la zone de pression engendrée par le changement de direction de l'écoulement (ces pressions ont été mesurées sur plusieurs modèles réduits).

Les drains sont donc placés dans une zone de faibles pressions, voire de dépressions, sous une eau peu dense (eau aérée) car située en tête du ressaut.

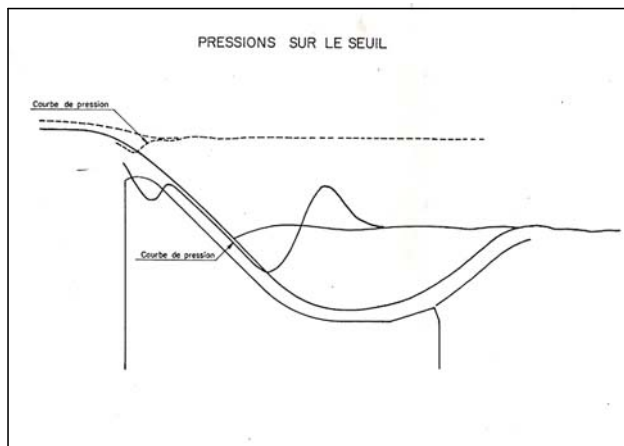


Figure n° 5 : Profil de pression lors d'un changement de direction (sur un seuil très court ; résultats d'essais sur modèle réduit)

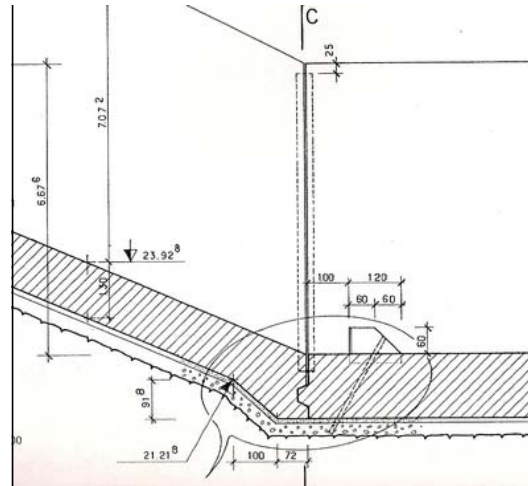


Figure n° 6 : Barrage d'Er Mel : Utilisation des blocs écran (« baffle blocks ») pour sortie des drains

III.7 Barrage de Mequinenza

Barrage réalisé sur l'Ebre, en Espagne, mis en service en 1966.

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateur (m ³ /s)	Chute (m)	Débit spécifique (m ³ /s/m)	Nombre de passe	Type de dissipation
81	11 000	# 55 m	118	5 (vannées)	Bassin à ressaut avec multiples dents et blocs

⁽⁵⁾ Afin, entre autre, de pouvoir diminuer la longueur du bassin et assurer son drainage.

Ici, le niveau aval était trop bas pour le bassin envisagé. De nombreux dispositifs de dissipation et de fractionnement de l'écoulement ont été nécessaires pour contenir le ressaut dans le bassin.

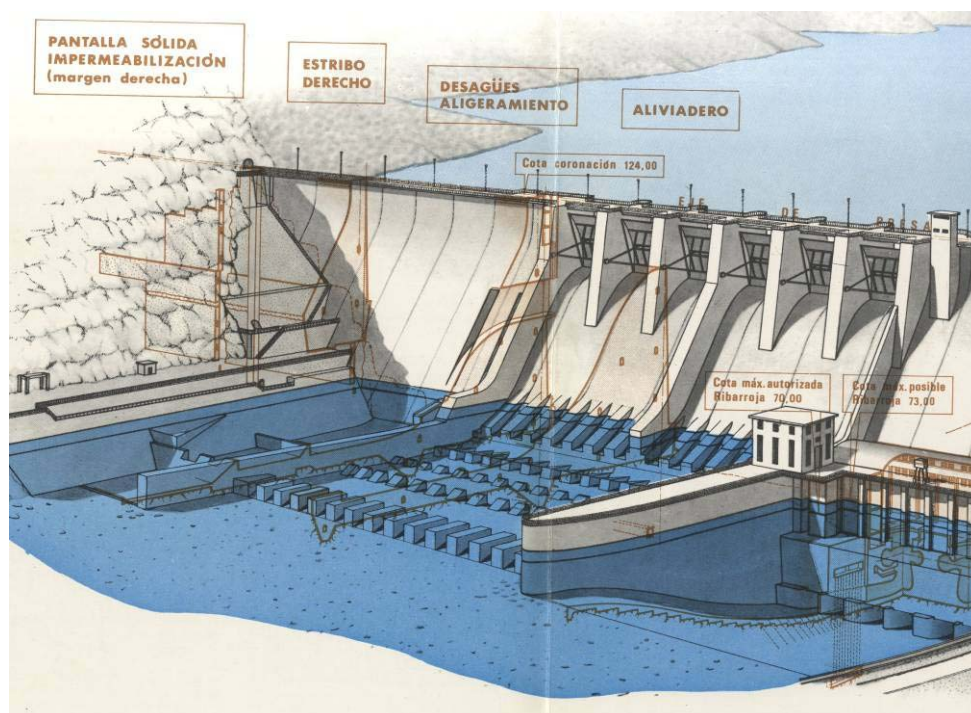


Figure n° 7 : Barrage de Mequinenza : vue d'aval (pertuis de fond, évacuateur et sortie usine)

III.8 Barrage de Sficifa

Barrage réalisé sur l'oued Sficifa, en Tunisie, mis en service en 2004.

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateur (m ³ /s)	Chute (m)	Débit spécifique (m ³ /s/m)	Nombre de passe	Type de dissipation
25	1200	23	22	1	Fosse non revêtue

(*) : L'ouvrage est complété par une digue fusible.

On a opté ici pour une fosse de dissipation non revêtue mais pré-excavée.

Le pied droit et la partie amont horizontale de la fosse est protégée, notamment pour les petits débits où la faible charge sur le seuil déversoir et le frottement sur l'évacuateur ne permet pas aux lames d'eau de s'éloigner de la partie terminale de l'évacuateur.

Afin d'assurer un étalement des lames d'eau et éviter la formation d'un ressaut aux débits courants⁽⁶⁾, la partie terminale de l'évacuateur est équipée de 4 dents. On a opté pour des formes assez simples⁽⁷⁾, compte tenu de la chute (14 m entre le seuil de départ et la fin du coursier) et de l'occurrence des crues.

⁽⁶⁾ On est tenté d'équiper la fin du coursier d'une cuiller couvrant toute la largeur de ce coursier. Dans ce cas, aux débits modérés, c'est à dire les plus courants, l'écoulement peut ne pas avoir assez d'énergie pour franchir le haut de la cuiller. Il se forme alors un ressaut et l'eau coule en nappe au pied de l'évacuateur, avec les problèmes que cela peut poser.

⁽⁷⁾ Par référence aux problèmes de cavitation (voir § « barrage de Kouris »)

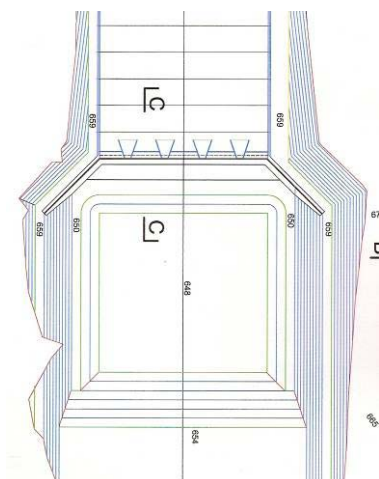


Figure n° 8 : Barrage de Sfificu :
vue en plan de l'évacuateur
(dents et fosse pré excavée)

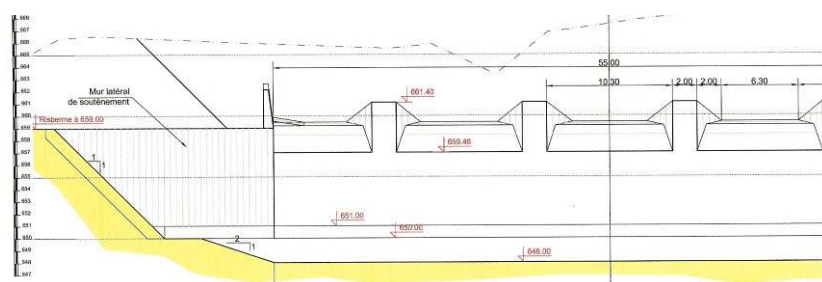


Figure n° 9 :
Barrage de Sfificu : évacuateur (partie terminale) vue partielle d'aval

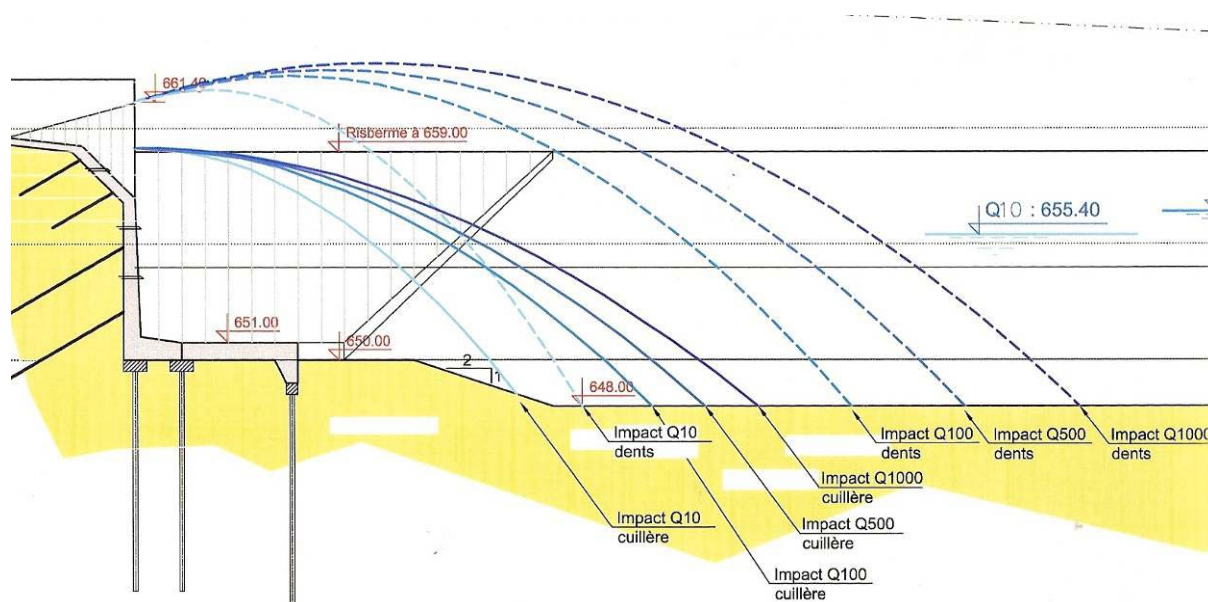


Figure n° 10 : Barrage de Sfificu : impacts des lames d'eau pour différentes crues

III.9 Barrage de Tucurui

Barrage réalisé sur la Tocantins, au Brésil, mis en service en 1984.

A notre connaissance, le record mondial en débit (crue de projet : $110\,000\text{ m}^3/\text{s}$)⁽⁸⁾.

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateur (m^3/s)	Nombre de passes	Type de dissipation
86	110 000	23	Fosse non revêtue pré excavée

Pour cet évacuateur, une solution avec fosse pré excavée a été retenue.

Cet évacuateur est un cas typique du régime hydrologique tropical, où la crue de 25 ans est de $52\,400\text{ m}^3/\text{s}$, donc déjà conséquente par rapport à la crue de 10 000 ans qui est de $105\,300\text{ m}^3/\text{s}$.

III.10 Barrage de Kouris

Barrage réalisé sur la rivière Kouris, à Chypre, mis en service en 1988.

⁽⁸⁾ Barrage des Trois Gorges (Chine) : $102\,500\text{ m}^3/\text{s}$

Hauteur barrage (m)	Débit évacuateur (m ³ /s)	Chute (m)	Débit spécifique (m ³ /s/m)	Nombre de passe	Type de dissipation
110	1900	# 90	44	1	Fosse non revêtue pré excavée

Ce barrage est d'équipé d'un évacuateur latéral (type « auge »), d'un coursier courbe et de largeur variable, équipé à son extrémité aval d'une cuiller. Cet évacuateur allie pré excavation importante dans un rocher de qualité limitée et étalement en largeur et longueur des lames d'eau quittant l'évacuateur.

Compte tenu de la chute (# 90 m), la forme de la cuiller a fait l'objet d'une étude particulière.

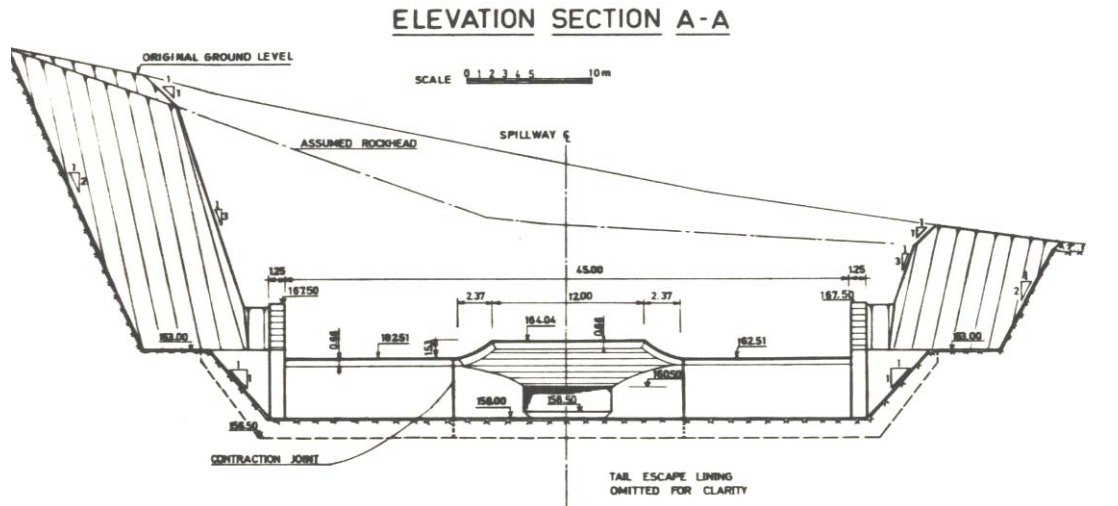


Figure n° 11 : Barrage de Kouris : vue de la cuiller (élévation)

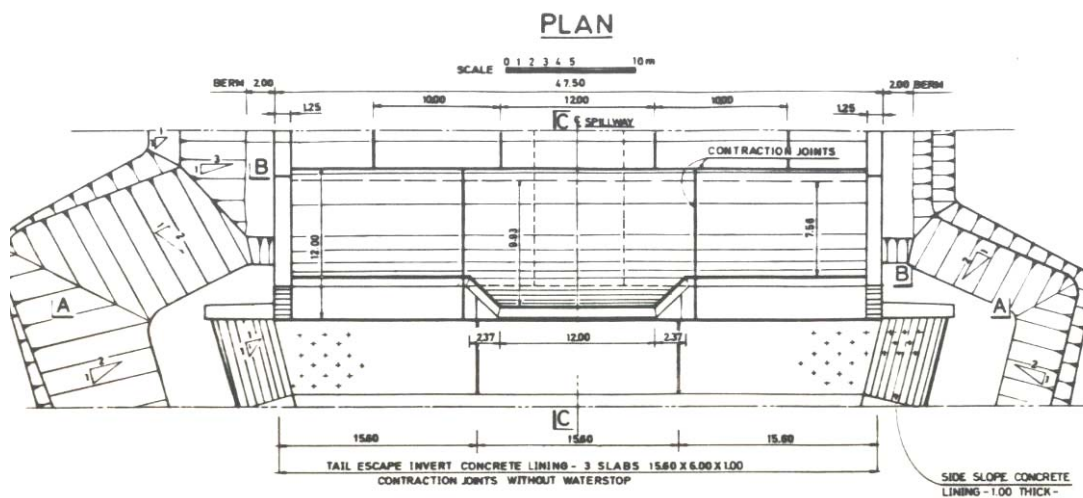
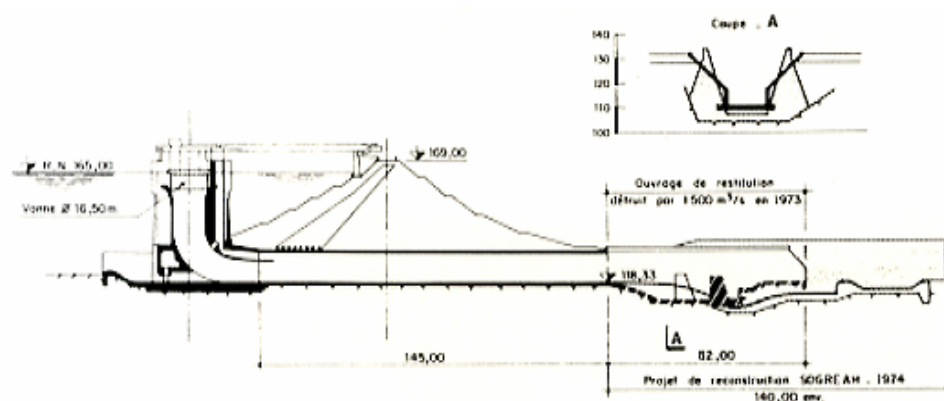


Figure n° 12 : Barrage de Kouris : vue en plan de la cuiller

III.11 Barrage de la Cheffia

Barrage de la Cheffia, sur l'oued Bounamoussa, en Algérie.

Le dissipateur initial comprenait un bassin à ressaut court avec des dents très importantes et des structures latérales relativement minces. Après la destruction de ce bassin lors d'une crue moyenne, celui-ci a été remplacé par un bassin à ressaut plus long, avec des murs poids latéraux et un seuil intermédiaire pour stabiliser le ressaut.



Evacuateur de la Chéffia

IV POINTS DIVERS

IV.1 Fosses de dissipation

Pour les fosses de dissipation non revêtues, on préfère parfois faire une pré excavation pour être sûr que la fosse se développera au bon endroit. La barre d'enrochement qui peut se former en aval peut poser le problème de surélévation des niveaux en crue et risque de noyage des ouvrages placés en partie inférieure du barrage (sortie de centrale hydro-électrique par exemple).

Exemples de fosse pré excavée : Tukurui, Kouris, Sficifa, Nangbeto (Togo).

Pour un pré dimensionnement, les valeurs de taux de dissipation d'énergie peuvent apporter des ordres de grandeur, associés bien sûr aux formules classiques de profondeur d'érosion (Veronese, Martins-B, etc, voir 18^{ème} congrès CIGB, Durban, 1994, Q71, R9).

Les calculs montrent que les profondeurs d'érosion estimées par les formules reconnues et celles calculées pour un ressaut sont très proches (dans un rapport de 0,9 à 1,2).

IV.2 Bassins à ressaut

IV.2.1 Longueur du bassin

La notion de longueur de ressaut (4 à 6 fois la hauteur conjuguée d'après la littérature existante) est un peu subjective. Elle dépend de la turbulence résiduelle et l'on pourrait envisager des bassins plus courts, à condition de disposer en aval de rocher assez sain et/ou d'y installer des protections supportant des vitesses élevées.

Pour des longueurs de bassins inférieurs à 3 à 3,5 fois la hauteur conjuguée, la taille des enrochements devient trop importante pour envisager un bassin aussi court (ceci est en tout cas valable pour des nombre de Froude amont F_1 inférieurs ou égaux à 6). Au-delà (pour $F_1 > 6$), il n'y a pas de données disponibles à notre connaissance, sauf si des essais (ou des simulations numériques) systématiques ont été menés depuis les essais effectués par Hunter Rouse et al.

IV.2.2 Estimation des taux de dissipation d'énergie

On a calculé, sur la base de bassins assez courts ($L=4 \times Y_2$), les taux de dissipation en fonction de la chute et du débit spécifique. On constate que ce taux est peu dépendant du débit spécifique.

q (m³/s/m)	10	10	10	50	50	50	100	100	100
chute (m)	10	30	50	10	30	50	10	30	50
P/V (kW/m³)	7,7	14.1	18.5	6.9	13.3	17.7	6.5	12.8	17,2

IV.3 Evacuateurs et dissipation d'énergie

Un article général fait le point sur ce sujet dans la houille blanche n° 2/3, 1992 : « la conception des évacuateurs vis à vis des problèmes de cavitation, de dissipation d'énergie, d'érosion et de cavitation ».

V BIBLIOGRAPHIE

- [1] Etat des connaissances sur le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages, A. Lencastre (HYDROPROJECTO), la Houille Blanche n°1, 1985.
- [2] Quelques aspects des techniques de modèles réduits à fond mobile pour les affouillements locaux, G.Johnson
- [3] Conception des ouvrages d'évacuation des crues et de vidange du barrage de Souapiti (Guinée), Dejoux, Sterenberg (COYNE & BELLIER) et P. Meilland (SOGREAH), la Houille Blanche n° 3 /4, 1983.
- [4] Une nouvelle conception de dissipation d'énergie pour les évacuateurs de crue de moyenne chute dans un lit affouillable, S. Alam (SOGREAH), CIGB, 16^{ème} congrès, San Francisco, 1988.
- [5] Modèles réduits et barrages, P. Jéhanno (SOGREAH), barrages et aménagements hydroélectriques en France et dans le monde, journées d'étude des 4 et 5 décembre 1991, CEIFICI, Paris.
- [6] Conception des évacuateurs vis à vis des problèmes de dissipation d'énergie, d'érosion et de cavitation, P. Meilland & P. Jéhanno (SOGREAH), La Houille Blanche n°2/3, 1992.
- [7] Scale model study of Katse dam spillway (Lesotho), P. Jéhanno, C. Odeyer & J.P. Huraut (SOGREAH), international symposium on dams and extreme floods, CIGB, spanish national committee, Grenada, 1992.
- [8] Hydraulic modelling for civil works, P. Meilland & P. Jéhanno (SOGREAH), revue Hydropower and Dams, July 1994.
- [9] Evacuateurs de Turwel et de Katse, P. Jéhanno et C. Odeyer, colloque technique, 25^{èmes} journées de la SHF, Chambéry, 1998 ; article correspondant dans la Houille Blanche n°5, 1999.
- [10] Open Channel hydraulics, Ven Te Chow, Ph.D, professor of hydraulic engineering, university of Illinois, Mac Graw Hill book Company, 1959.
- [11] Open Channel Flow, Second edition, Hanif Chaudhry, University of South Carolina, Springer, 2008,
- [12] Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, Peterka, USBR, Eighth Printing : May 1984