

**ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL
(OMVS)**

**ETUDE D'EVALUATION DES IMPACTS
DE L'OUVERTURE D'UNE EMBOUCHURE
ARTIFICIELLE A L'aval DE ST-LOUIS
SUR LE BARRAGE DE DIAMA**

Modélisation physique du barrage de Diama

Mai 2005

Rapport 11476 RP 04

**ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SENEgal
(OMVS)**

**ETUDE D'EVALUATION DES IMPACTS
DE L'OUVERTURE D'UNE EMBOUCHURE
ARTIFICIELLE A L'aval DE ST-LOUIS
SUR LE BARRAGE DE DIAMA**

Modélisation physique du barrage de Diama

Mai 2005

Rapport 11476 RP 04

A	27/05/05	Première émission	G. MILESI	B. MAYEUR	B. MAYEUR
Révision	Date	Sujet de la révision	Rédaction	Contrôle	Approbation

SOMMAIRE

(ce rapport comporte 12 pages + 1 annexe)

1.	OBJET DU RAPPORT	1
2.	OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS DU CONSULTANT RELATIVES À LA MODÉLISATION PHYSIQUE DU BARRAGE DE DIAMA	2
2.1.	Objectif	2
2.2.	Résultats du modèle physique bidimensionnel	3
2.3.	Résultats du modèle tridimensionnel	6
	ANNEXE	12

1. OBJET DU RAPPORT

Le présent rapport est remis à l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal) par le consultant Coyne et Bellier dans le cadre du contrat d'étude signé par les deux parties en juin 2004, ayant pour objet l'étude d'évaluation des impacts de l'ouverture d'une embouchure artificielle à l'aval de Saint-Louis sur le barrage de Diama.

Il fait suite :

- au rapport 11476 RP 01A du 27/08/2004, intitulé « Recommandations relatives à l'exploitation du barrage de Diama pendant l'hivernage 2004 »,
- au rapport 11476 RP 02A du 25/02/2005, intitulé « Rapport relatif aux levés bathymétriques »,
- au rapport 11476 RP 03A du 24/05/2005, intitulé « Modélisation numérique du fleuve Sénégal à l'aval du barrage de Diama ».

Ce rapport présente les études réalisées sur modèles réduits hydrauliques :

- un modèle bidimensionnel vanné en section courante (échelle 1/49) représentant l'écoulement dans une passe du barrage et permettant de vérifier la stabilité de l'ouvrage pour les nouvelles conditions d'écoulement établies depuis l'ouverture de la brèche,
- un modèle tridimensionnel (échelle 1/105) de l'ensemble du barrage et des ouvrages annexes, afin d'une part de compléter l'étude de stabilité réalisée sur le modèle 2D et d'autre part de vérifier les champs de vitesses.

Les modèles et essais ont été réalisés en sous-traitance par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège, de novembre 2004 à mai 2005.

Le chapitre 2 ci-après présente les observations et conclusions de Coyne et Bellier sur la modélisation physique réalisée.

Le rapport final du Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège est reproduit en annexe au présent rapport.

2. OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS DU CONSULTANT RELATIVES A LA MODELISATION PHYSIQUE DU BARRAGE DE DIAMA

2.1. Objectif

Les études d'exécution du barrage de Diama, basées notamment sur les résultats d'une étude sur modèle réduit hydraulique au laboratoire de la SOGREAH (1976-1977), avaient permis de dimensionner les protections amont et aval nécessaires à prévenir les risques d'érosion et avaient abouti à la recommandation de règles de gestion permettant d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

Or, l'ouverture d'une brèche dans la Langue de Barbarie en octobre 2003, a modifié les conditions d'écoulement à l'aval du barrage, d'une part en abaissant le niveau aval moyen et d'autre part en rendant ce niveau plus sensible à l'effet des marées, avec pour corollaire une augmentation des énergies à dissiper.

C'est dans ce cadre que le bureau d'études Coyne et Bellier a demandé au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège de réaliser une modélisation physique du barrage représentative du fonctionnement de l'ouvrage dans les nouvelles conditions hydrauliques.

Deux modèles physiques du barrage de Diama ont été réalisés :

- un modèle bidimensionnel vanné en section courante (échelle 1/49) représentant l'écoulement dans une passe et permettant de vérifier la stabilité de l'ouvrage pour les nouvelles conditions d'écoulement établies depuis l'ouverture de la brèche,
- un modèle tridimensionnel (échelle 1/105) de l'ensemble du barrage et des ouvrages annexes, afin d'une part de compléter l'étude de stabilité réalisée sur le modèle 2D et d'autre part de vérifier les champs de vitesses.

2.2. Résultats du modèle physique bidimensionnel

Les premiers essais réalisés sur le modèle 2D en canal vitré ont permis de déterminer le type et la granulométrie des enrochements de protection et du fond affouillable représentatifs de ceux présents à Diamal.

Afin de déterminer la granulométrie des enrochements de protection et du fond affouillable à mettre en place sur le modèle, le Laboratoire a tenté de reproduire la bathymétrie observée aux abords du barrage de Diamal (relevée par l'IRD en juin 2004). A cette fin, les événements majeurs observées depuis l'origine du barrage en terme de débits et d'énergie dissipée à l'aval du barrage ont été simulés (crue du 22/09/1994 avec un débit de 1740 m³/s pour une énergie maximale observée de 1514 m⁴/s et crue du 05/10/1994 avec un débit maximal observé de 2100 m³/s pour une énergie de 924 m⁴/s). Différents matériaux ont été testés avant d'arriver à reproduire la bathymétrie actuelle. Les matériaux finalement choisis sont des concassés calcaires pour les enrochements de protection (2 à 4 mm pour la couche de transition et 6 à 10 mm pour la couche de protection) et de l'Hydroxyde d'aluminium (0 à 0,19 mm et une densité de 2,4) pour le fond affouillable. Ces matériaux permettent de reproduire la bathymétrie actuelle avec suffisamment de précision au centre du canal (différence de niveaux inférieure à 50 cm) alors que sur les parois l'érosion est plus importante (de l'ordre de 2 m). Les essais ultérieurs sur le modèle réduit 3D, on permis de montrer que ce phénomène était dû à l'effet des piles de l'évacuateur sur les écoulements et non pas à l'influence de la paroi du canal : il ne s'agit pas d'un effet de bord du modèle.

Après validation des matériaux utilisés sur le modèle 2D, des simulations du fonctionnement de l'ouvrage ont été réalisées de manière à vérifier sa stabilité : débits variant de 0 à 6600 m³/s pour un niveau amont du barrage égal à +1,5 m IGN et un niveau aval correspondant à la courbe de tarage aval déterminée à partir des résultats de la modélisation numérique (cf. rapport 11476 RP 03).

Les figures 1 et 2 ci-dessous illustrent le phénomène de rouleaux qui se créent à la sortie de l'évacuateur. Les traits rouges de la figure 1 sont des petits fils de laine qui ondulent autour d'un axe sous l'effet du courant.

On observe distinctement l'existence d'un courant inverse dans le fond du canal. Ce courant inverse est la conséquence du rouleau créé par le ressaut de l'évacuateur comme le montre la figure 2. Ce rouleau entraîne une accumulation des matériaux au pied du barrage, phénomène favorable à la stabilité du barrage.



Figure 1 : Champ de vitesse en sortie de vanne

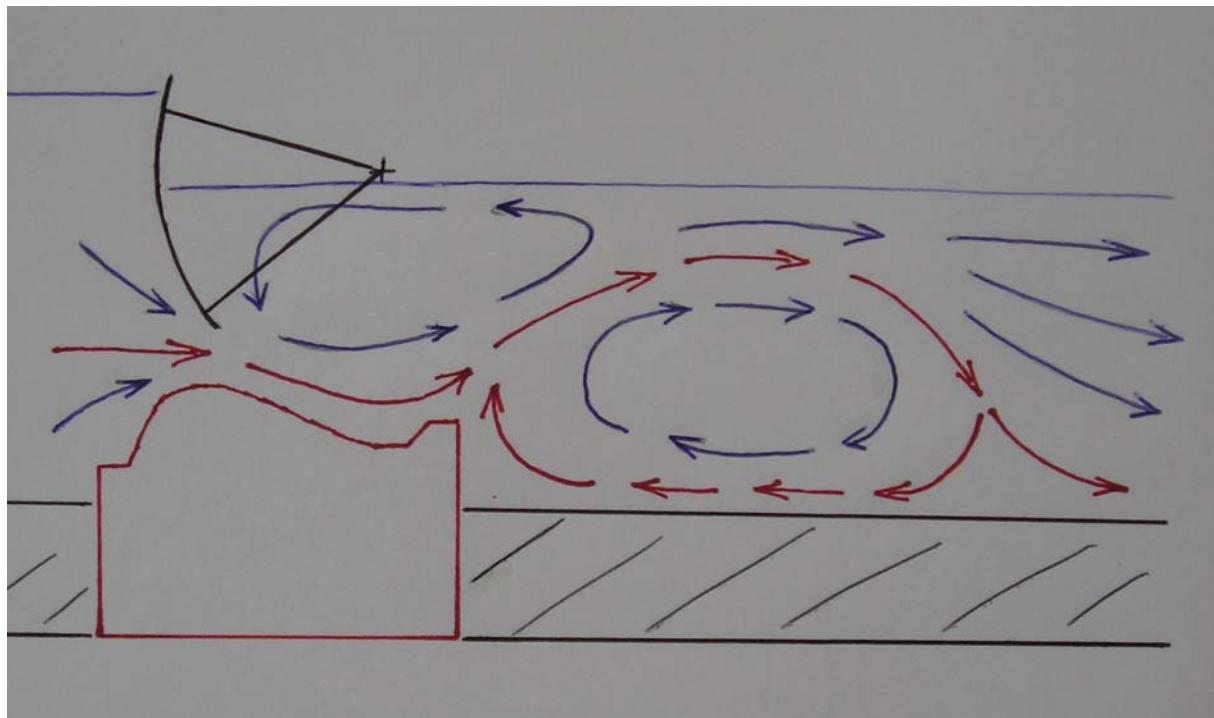


Figure 2 : Schéma du ressaut et du rouleau en sortie de vanne

Les résultats de l'ensemble des essais d'érosion sur modèle 2D sont présentés sur la figure 3. On constate que même lorsque le barrage est soumis à un débit de 6 600 m³/s (crue de projet), l'érosion ne dépasse pas la cote de -19 m avec une pente de la cuvette douce et stabilisée. La zone des enrochements de protection en pied de barrage est stable et ne subit pas de déplacement significatif.

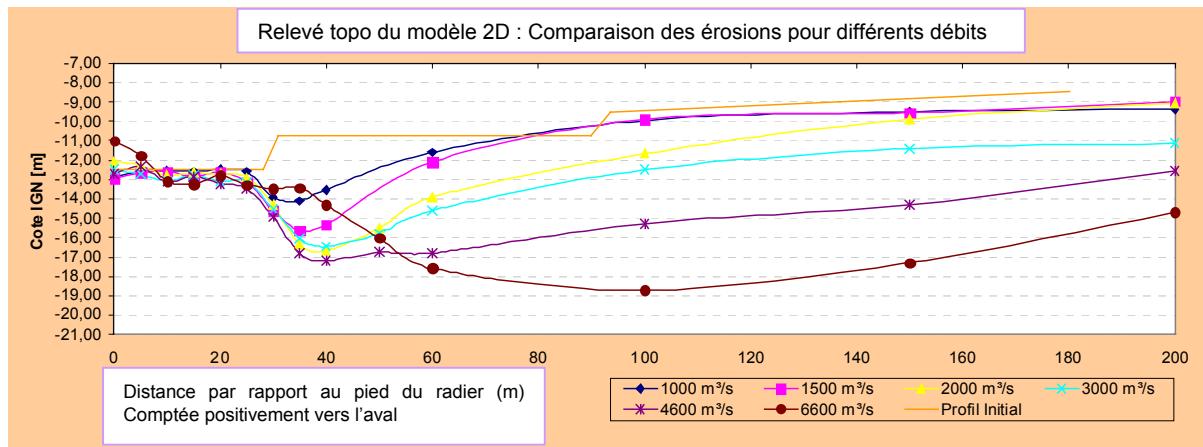


Figure 3 : Résultats des essais sur modèle réduit 2D - Relevés topographiques (1000<Q<6600 m³/s)

2.3. Résultats du modèle tridimensionnel

Les mêmes essais ont ensuite été réalisés sur le modèle 3D. Le choix des matériaux utilisés sur le modèle 3D découle des résultats du réglage de la granulométrie effectué sur le modèle 2D.

La figure 4 ci-dessous montre l'érosion observée à l'aval du barrage pour un débit de 1 000 m³/s. On retrouve bien comme sur le modèle 2D une érosion plus importante au droit des piles qu'aux centres des passes de l'évacuateur. Ce phénomène s'atténue pour disparaître avec les débits plus importants où l'érosion est similaire tout au long de l'évacuateur hormis près des culées où l'érosion est moindre.



Figure 4 : Résultats des essais sur modèle 3D pour un débit de 1000 m³/s.

Les relevés topographiques réalisés sur le profil longitudinal au droit du centre de l'évacuateur (entre les passes centrales P4 et P3 : $x=-12,15$ m) sont présentés sur la figure 5 pour les différents essais.

La cuvette d'érosion maximale rencontrée pour la crue de projet se situe 60 m en aval du pied de l'évacuateur. Les zones d'enrochements restent stables même pour les plus forts débits. On constate sur chacun des essais, une accumulation de matériaux au pied de l'évacuateur due au rouleau observé dans cette zone (figure 2).

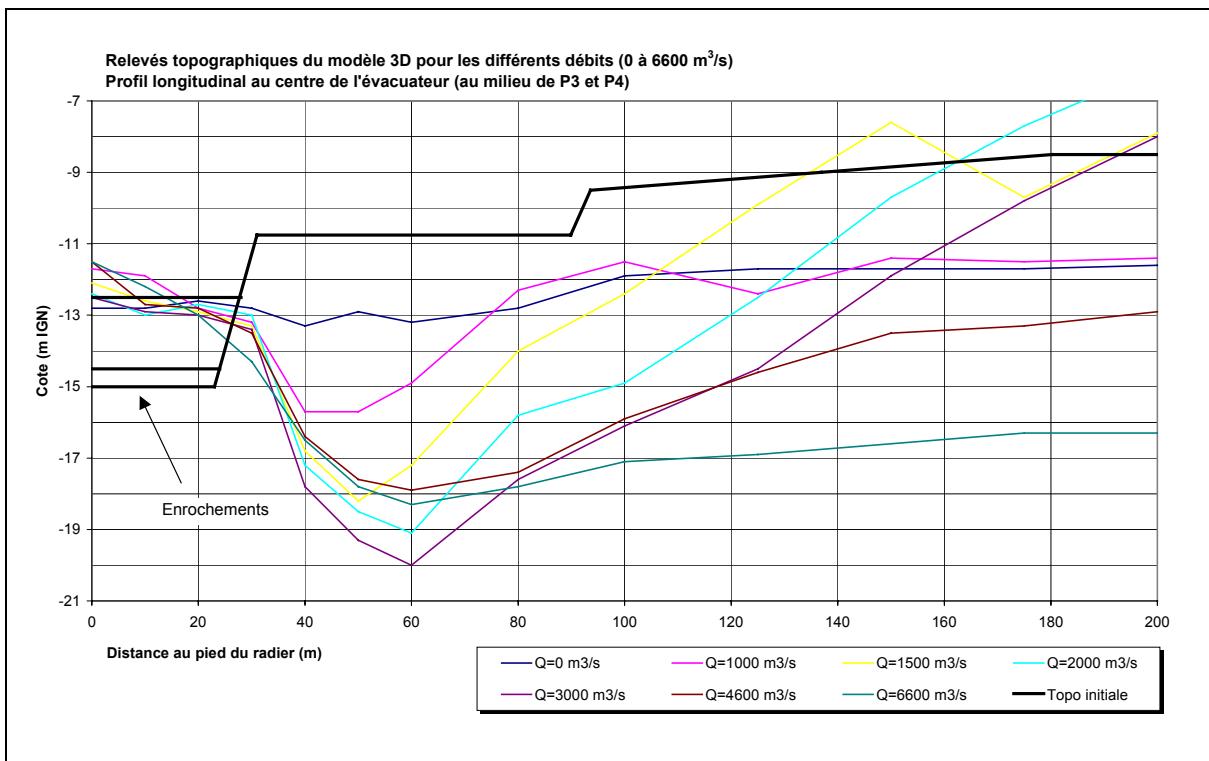


Figure 5 : Résultats des essais sur modèle réduit 3D - Relevés topographiques ($0 < Q < 6600 \text{ m}^3/\text{s}$) au centre de l'évacuateur

Un relevé topographique de l'ensemble de la zone d'étude aval réalisé pour la simulation correspondant à la crue de projet est présenté en perspective sur la figure 6.

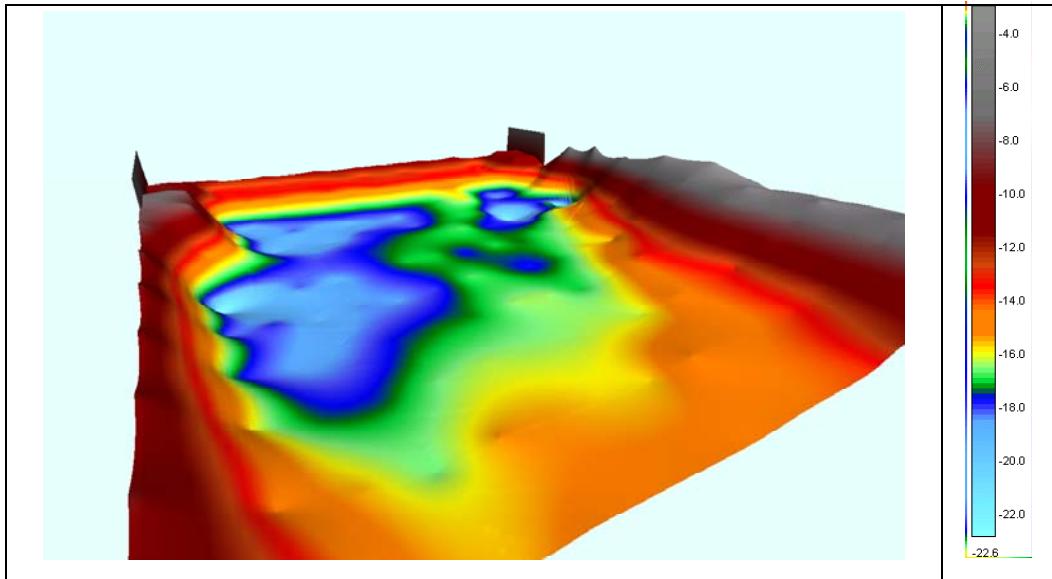


Figure 6 : Résultats des essais sur modèle réduit 3D - Relevés topographiques ($Q=6600 \text{ m}^3/\text{s}$)

On observe une accumulation de sédiments en aval de la culée rive droite qui s'explique par les champs de vitesses observés dans cette zone (voir figures 7 à 10 ci-après). L'érosion ne présente pas de danger vis-à-vis de la stabilité de la culée.



Figure 7 : Ligne de courant dans la zone aval de la culée rive droite – $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$

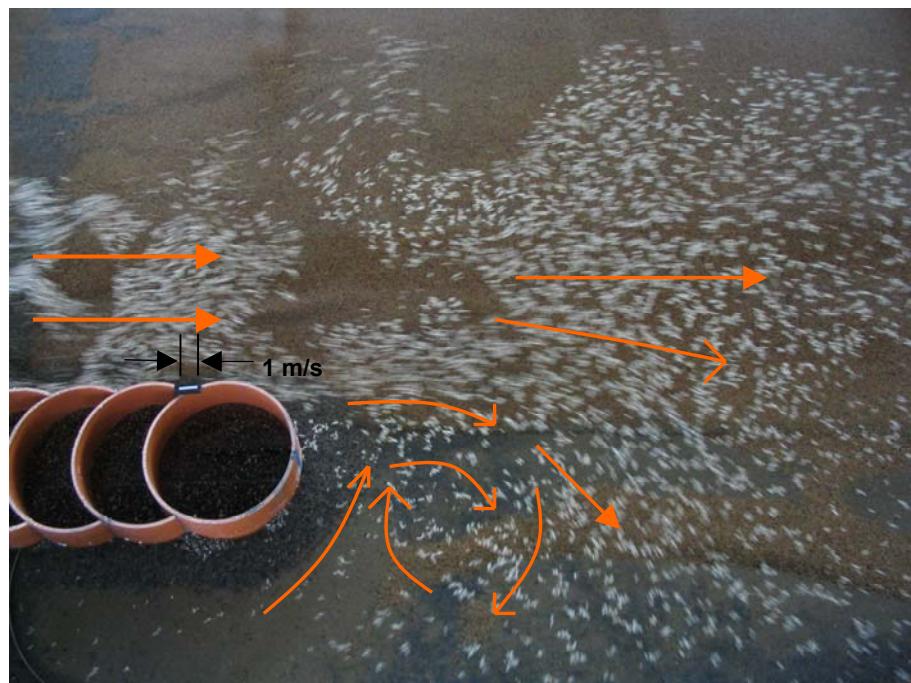


Figure 8 : Ligne de courant dans la zone aval de la culée rive droite – $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 9 : Ligne de courant dans la zone aval de la culée rive droite – $Q=6600 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 10 : Accumulation de sédiments au droit de la culée rive droite pour $Q=6600 \text{ m}^3/\text{s}$

Enfin, comme le montre la figure 11 ci-après, les érosions observées sur le modèle 3D à l'aval des vannes sont plus importantes que celles observées sur le modèle 2D. Cette différence peut s'expliquer par la plus faible échelle du modèle 3D (1/105) qui permet de modéliser avec précision les champs de courant mais ne permet pas de modéliser avec autant de précision que sur le modèle 2D l'entraînement des sédiments. Les simulations observées sur le modèle 3D sont donc conservatives vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage.

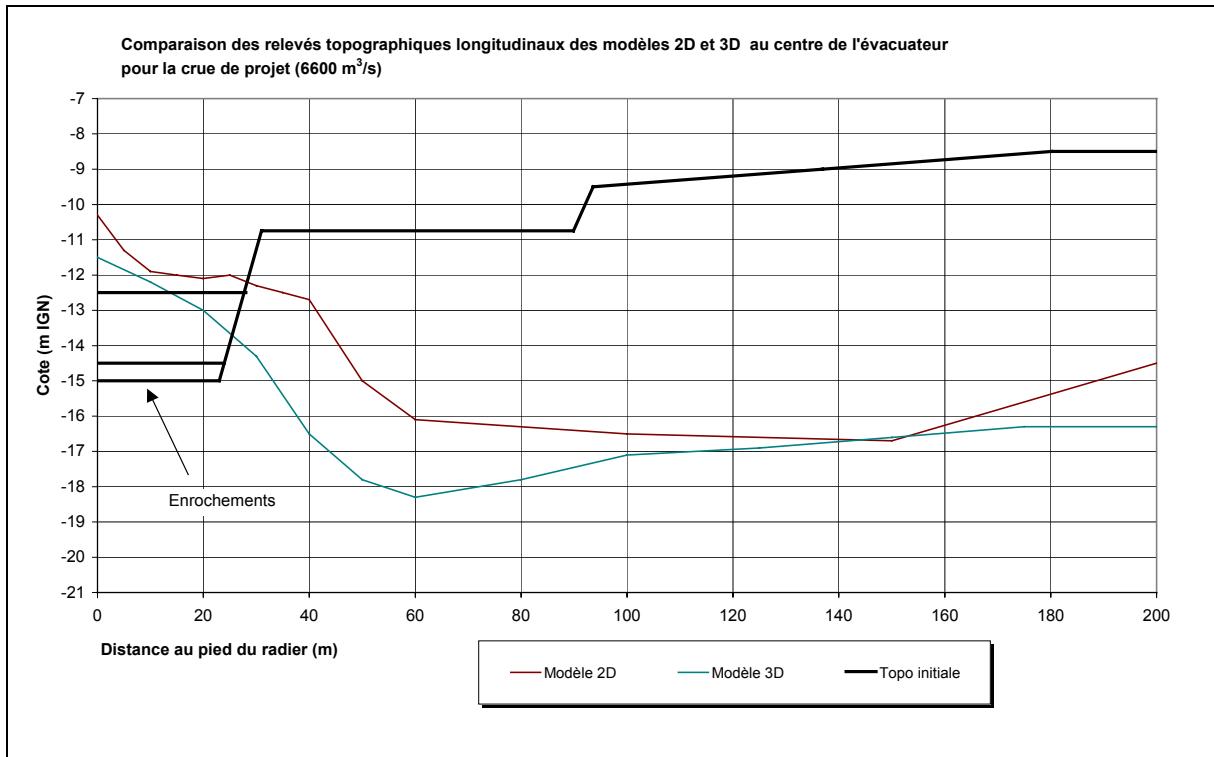


Figure 11 : Comparaison des relevés topographiques sur modèles 2D et 3D au centre de l'évacuateur pour la crue de projet

ANNEXE

**RAPPORT FINAL
DU LABORATOIRE DE CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES,
UNIVERSITE DE LIEGE (BELGIQUE)**

Professeur A.G. LEJEUNE

(96 PAGES)

BARRAGE de DIAMA sur le fleuve Sénégal

RAPPORT FINAL

Modèles réduits hydrauliques du Barrage de Diam sur le fleuve Sénégal

Mai 2005

a	04 Mai 2005	Première émission	O.Humblet	A. Lejeune	A. Lejeune
Rév.	Date	Sujet révision	Rédaction	Contrôle	Approbation

Table des Matières

COMPTE RENDU N°1

1. INTRODUCTION	8
1.1. BUT DE L'ÉTUDE	8
1.2. BUREAUX RESPONSABLES	9
1.3. DESCRIPTION DU BARRAGE DE DIAMA	9
1.4. RÈGLES DE SIMILITUDES ET SÉQUENCES DES ÉTUDES	10
2. MODÈLE 2D	13
2.1. RÉALISATION DU MODÈLE	13
2.2. RÉGLAGE DU MODÈLE 2D	15
2.3. ETALONNAGE DE L'ÉVACUATEUR	16
2.3.1. Méthodologie	16
2.3.2. Résultats de l'étalonnage	16
2.4. RÉGLAGE DE LA GRANULOMÉTRIE	21
2.4.1. Evènements majeurs rencontrés à Diamal	22
2.4.2. Données granulométriques disponibles	22
2.4.3. Matériaux testés	23
2.4.4. Essai n°1 : Sable 01 MER + Sable 03 CB + Sciure calibrée	24
❖ Observation de l'essai	24
❖ Conclusion de l'essai	24
2.4.5. Essai n°2 : Farine de Quartz « B.O. »	25
❖ Observation de l'essai	25
❖ Conclusion de l'essai	25
2.4.6. Essais n°3 à 5 : Granulé Plastique Noir, Brique Pilée, Résorbant	25
❖ Conclusion des essais	25
2.4.7. Essai n°6 : Hydroxyde d'aluminium Al(OH) ₃	26
❖ Observation de l'essai	28
❖ Conclusion de l'essai	28
2.4.8. Lignes de courant en sortie de l'évacuateur	29
2.5. CONCLUSION DES ESSAIS GRANULOMÉTRIQUES	30

COMPTE RENDU N°2

1. INTRODUCTION	32
2. BUT DE L'ÉTUDE	33
3. PROGRAMME DES ESSAIS	34
4. ESSAIS	35
4.1. RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE DE LA CUVETTE D'ÉROSION	35
4.2. RÉSULTATS	36
4.2.1. Débit 500 m ³ /s	36
4.2.2. Débit 1000 m ³ /s	36
4.2.3. Débit 1500 m ³ /s	37
4.2.4. Débit 2000 m ³ /s	39
4.2.5. Débit 3000 m ³ /s	41
4.2.6. Débit 4600 m ³ /s	42
4.2.7. Débit 6600 m ³ /s	44

<u>4.2.8.</u>	<u>Comparaison des essais</u>	46
<u>4.2.9.</u>	<u>Conclusion</u>	47
<u>4.2.10.</u>	<u>Données numériques des relevés topographiques</u>	48

COMPTE RENDU N°3

<u>1.</u>	<u>INTRODUCTION</u>	51
<u>2.</u>	<u>BUT DE L'ÉTUDE</u>	51
<u>3.</u>	<u>RÉALISATION DU MODÈLE</u>	52
<u>4.</u>	<u>PROGRAMME DES ESSAIS</u>	54
<u>5.</u>	<u>ESSAIS ET RÉSULTATS</u>	54
<u>5.1.</u>	<u>CUVETTE D'ÉROSION DU MODÈLE 3D</u>	54
❖	<u>Configuration Initiale</u>	55
❖	<u>1000 m³/s</u>	56
❖	<u>1500 m³/s</u>	57
❖	<u>2000 m³/s</u>	58
❖	<u>3000 m³/s</u>	59
❖	<u>4600 m³/s</u>	60
❖	<u>6600 m³/s</u>	61
❖	<u>Complément à propos de l'érosion en aval de la culée rive droite</u>	62
<u>5.2.</u>	<u>RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES DU MODÈLE 3D</u>	63
❖	<u>1000 m³/s</u>	64
❖	<u>1500 m³/s</u>	65
❖	<u>2000 m³/s</u>	65
❖	<u>3000 m³/s</u>	66
❖	<u>4600 m³/s</u>	66
❖	<u>6600 m³/s</u>	67
❖	<u>Données numériques des relevés topographiques</u>	68
<u>5.3.</u>	<u>CHAMPS DE VITESSES</u>	70
<u>5.3.1.</u>	<u>Champs de vitesses à l'entonnement amont</u>	70
❖	<u>1000 m³/s</u>	71
❖	<u>1500 m³/s</u>	71
❖	<u>2000 m³/s</u>	72
❖	<u>3000 m³/s</u>	72
❖	<u>4600 m³/s</u>	73
❖	<u>6600 m³/s</u>	73
❖	<u>Conclusion</u>	73
<u>5.3.2.</u>	<u>Champs de vitesses à l'aval de la culée rive droite</u>	74
❖	<u>1000 m³/s</u>	74
❖	<u>1500 m³/s</u>	75
❖	<u>2000 m³/s</u>	75
❖	<u>3000 m³/s</u>	76
❖	<u>4600 m³/s</u>	76
❖	<u>6600 m³/s</u>	77
❖	<u>Conclusion</u>	77
<u>5.3.3.</u>	<u>Visualisation de l'écoulement aux abords des différents ouvrages</u>	78
❖	<u>1500 m³/s</u>	79
❖	<u>2000 m³/s</u>	82
❖	<u>3000 m³/s</u>	86
❖	<u>4600 m³/s</u>	89
❖	<u>6600 m³/s</u>	93
❖	<u>Conclusion</u>	96

Table des Figures

COMPTE RENDU N°1

<u>Figure 1 : Situation du barrage de Diamra</u>	8
<u>Figure 2 : Vue aval du barrage de Diamra</u>	9
<u>Figure 3 : Diagramme de Moody</u>	11
<u>Figure 4 : Implantation du modèle 2D sur le plan général du barrage de Diamra</u>	13
<u>Figure 5 a et b : Vue du radier et de la vanne segment à l'échelle 1/49</u>	14
<u>Figure 6 : Passe complète - Vue Amont</u>	14
<u>Figure 7 : Passe complète - Vue Aval</u>	14
<u>Figure 8 : Vue Latérale d'ensemble</u>	15
<u>Figure 9 : Détail du coursier</u>	15
<u>Figure 10 : Relevé Bathymétrique (IRD - Mars 2004)</u>	16
<u>Figure 11 : Etalonnage du Déversoir Libre (vannes ouvertes)</u>	17
<u>Figure 12 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 1000 \text{m}^3/\text{s}$</u>	17
<u>Figure 13 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 1750 \text{m}^3/\text{s}$</u>	18
<u>Figure 14 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 2100 \text{m}^3/\text{s}$</u>	18
<u>Figure 15 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 2500 \text{m}^3/\text{s}$</u>	19
<u>Figure 16 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 4500 \text{m}^3/\text{s}$</u>	19
<u>Figure 17 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 6600 \text{m}^3/\text{s}$</u>	20
<u>Figure 18 : Granulométrie – Profil Initial Amont</u>	21
<u>Figure 19 : Granulométrie – Profil Initial Aval</u>	21
<u>Figure 20 : Résumé des caractéristiques des matériaux testés</u>	23
<u>Figure 21 a et b : Sable 01MER et 03CB – Durée de l'essai 266h</u>	24
<u>Figure 22 : Farine de Quartz « BO » – Durée de l'essai 133 h</u>	25
<u>Figure 23 a et b : Erosion du lit aval dans la zone des enrochements de protection et immédiatement après - Al(OH)3: T=70 h</u>	26
<u>Figure 24 a et b : Erosion du lit aval - suite en aval de la figure 23 - et détail vue en plan de la zone de protection - Al(OH)3: T=70 h</u>	26
<u>Figure 25 : Erosion du lit aval juste après la zone d'enrochements de protection Al(OH)3: T=154 h</u>	27
<u>Figure 26 : Erosion du lit aval - suite en aval de la figure 25 - Al(OH)3: T=154 h</u>	27
<u>Figure 27 : Erosion du lit aval vue générale de profil Al(OH)3 T=154 h</u>	27
<u>Figure 28 : Erosion de l'Al(OH)3 et relevés bathymétriques sur la paroi vitrée – Comparaison</u>	28
<u>Figure 29 : Champ de vitesse en sortie de vanne</u>	29
<u>Figure 30 : Schéma du ressaut et du rouleau en sortie de vanne</u>	29

COMPTE RENDU N°2

<u>Figure 31 : Comparaison entre le profil de la cuvette d'érosion actuellement observée à Diamra et celui obtenu dans le modèle 2D après les essais granulométriques</u>	33
<u>Figure 32: Configuration initiale des essais d'érosion</u>	34
<u>Figure 33: Mesure de la fosse d'érosion au laser</u>	35
<u>Figure 34: Quadrillage de la fosse d'érosion - Points de mesures des relevés topographiques</u>	35
<u>Figure 35: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	36
<u>Figure 36: Cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	36
<u>Figure 37: Cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval</u>	37
<u>Figure 38: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	37
<u>Figure 39: Cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	38
<u>Figure 40: Cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval</u>	38
<u>Figure 41: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	39
<u>Figure 42: Cuvette d'érosion pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	39
<u>Figure 43: Enrochement de protection pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	40

<u>Figure 44: Cuvette d'érosion pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval</u>	40
<u>Figure 45: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	41
<u>Figure 46: Cuvette d'érosion pour $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	41
<u>Figure 47: Cuvette d'érosion après $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue d'ensemble de profil</u>	41
<u>Figure 48: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	42
<u>Figure 49: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	42
<u>Figure 50: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval</u>	43
<u>Figure 51: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue de détail au 60m</u>	43
<u>Figure 52: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	44
<u>Figure 53: Cuvette d'érosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite</u>	44
<u>Figure 54: Zone des enrochements de protection $Q = 6600$ – Sédiments provenant de l'amont</u>	45
<u>Figure 55: Cuvette d'érosion après $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval</u>	45
<u>Figure 56: Relevé Topo - Evolution de la fosse d'érosion en fonction du débit</u>	46
<u>Figure 57: Comparaison des différents profils de la cuvette d'érosion selon les débits</u>	46
<u>Figure 58 : Evolution de la fosse d'érosion. Echelles en x et y identiques</u>	47

COMPTE RENDU N°3

<u>Figure 59 : Implantation du modèle 3D sur le plan général du barrage de Diamal</u>	52
<u>Figure 60 : Vue d'ensemble – Modèle 3D échelle 1/105</u>	53
<u>Figure 61 : Vue de l'évacuateur – Modèle 3D échelle 1/105</u>	53
<u>Figure 62 : Configuration initiale – Vue latérale rive droite</u>	55
<u>Figure 63 : Configuration initiale – Vue longitudinale aval</u>	55
<u>Figure 64 : $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive gauche</u>	56
<u>Figure 65 : $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	56
<u>Figure 66 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite</u>	57
<u>Figure 67 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	57
<u>Figure 68 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite</u>	58
<u>Figure 69 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	58
<u>Figure 70 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive gauche</u>	59
<u>Figure 71 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	59
<u>Figure 72 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite</u>	60
<u>Figure 73 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	60
<u>Figure 74 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite</u>	61
<u>Figure 75 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval</u>	61
<u>Figure 76 : Erosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ avec coffrage</u>	62
<u>Figure 77 : Erosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ sans coffrage</u>	62
<u>Figure 78 : Quadrillage de la fosse d'érosion pour les relevés topographiques</u>	63
<u>Figure 79 : Mesure de la fosse d'érosion au distance mètre laser</u>	64
<u>Figure 80 : Relevé topographique – $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	64
<u>Figure 81 : Relevé topographique – $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	65
<u>Figure 82 : Relevé topographique – $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	65
<u>Figure 83 : Relevé topographique – $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	66
<u>Figure 84 : Relevé topographique – $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	66
<u>Figure 85 : Relevé topographique – $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	67
<u>Figure 86 : Schéma de la prise de vue A</u>	70
<u>Figure 87 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	71
<u>Figure 88 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	71
<u>Figure 89 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	72
<u>Figure 90 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	72
<u>Figure 91 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	73
<u>Figure 92 : Entonnoir amont (vue A) – $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	73
<u>Figure 93 : Schéma de la prise de vue B</u>	74
<u>Figure 94 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	74
<u>Figure 95 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	75
<u>Figure 96 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	75
<u>Figure 97 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	76

<u>Figure 98 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	76
<u>Figure 99 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$</u>	77
<u>Figure 100 : Visualisation de l'écoulement - Schéma des prises de vue 1 à 4</u>	78
<u>Figure 101 : Visualisation de l'écoulement - Schéma des prises de vue 5 à 7</u>	78
<u>Figure 102 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »</u>	79
<u>Figure 103 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »</u>	79
<u>Figure 104 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »</u>	80
<u>Figure 105 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »</u>	80
<u>Figure 106 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »</u>	81
<u>Figure 107 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »</u>	81
<u>Figure 108 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »</u>	82
<u>Figure 109 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »</u>	82
<u>Figure 110 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »</u>	83
<u>Figure 111 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »</u>	83
<u>Figure 112 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »</u>	84
<u>Figure 113 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »</u>	84
<u>Figure 114 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »</u>	85
<u>Figure 115 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »</u>	85
<u>Figure 116 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »</u>	86
<u>Figure 117 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »</u>	86
<u>Figure 118 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »</u>	87
<u>Figure 119 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »</u>	87
<u>Figure 120 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »</u>	88
<u>Figure 121 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »</u>	88
<u>Figure 122 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »</u>	89
<u>Figure 123 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »</u>	89
<u>Figure 124 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »</u>	90
<u>Figure 125 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »</u>	90
<u>Figure 126 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »</u>	91
<u>Figure 127 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »</u>	91
<u>Figure 128 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »</u>	92
<u>Figure 129 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »</u>	92
<u>Figure 130 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »</u>	93
<u>Figure 131 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »</u>	93
<u>Figure 132 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »</u>	94
<u>Figure 133 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »</u>	94
<u>Figure 134 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »</u>	95
<u>Figure 135 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »</u>	95
<u>Figure 136 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »</u>	96

Compte Rendu N°1

Etalonnage et Essais réalisés pour le réglage de la granulométrie sur le modèle 2D en canal vitré

1. Introduction

1.1. But de l'étude

Une étude d'évaluation des impacts de l'ouverture d'une embouchure artificielle à l'aval de Saint-Louis sur le barrage de Diamma, a été confiée par l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) à Coyne et Bellier en juillet 2004.

Le barrage de Diamma est situé sur le fleuve Sénégal, à la frontière entre les Etats de la Mauritanie et du Sénégal, à environ 25 km en amont de la ville de Saint-Louis. Il contrôle la stabilité des niveaux d'eau amont et empêche la remontée de la langue salée depuis l'océan, afin de favoriser l'irrigation. Il a été mis en service en 1987. (figure 1)



Figure 1 : Situation du barrage de Diamma

Vu ses conditions de fondation, l'ouvrage est sensible aux risques d'affouillements lors du passage des crues. Les études d'exécution du barrage, basées notamment sur les résultats d'une étude sur modèle réduit hydraulique, avaient permis de dimensionner les protections nécessaires à prévenir ces risques et avaient abouti à la recommandation de règles d'opération des vannes capables d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

Or, l'ouverture d'une brèche dans la Langue de Barbarie en octobre 2003, a modifié les conditions d'écoulement à l'aval du barrage, d'une part en abaissant le niveau aval moyen et d'autre part en rendant ce niveau plus sensible à l'effet des marées, avec pour corollaire une augmentation des niveaux d'énergie à dissiper.

C'est dans ce cadre que le bureau d'études Coyne et Bellier demande aux Laboratoires de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège d'évaluer si les protections existantes contre les affouillements sont suffisantes ou si elles doivent être renforcées et, le cas échéant, de dimensionner ces renforcements.

Dans ce contexte, la présente étude concerne la réalisation de deux modèles physiques du barrage de Diamma et d'un certain nombre d'essais décrits ci-après que Coyne et Bellier a confié aux Laboratoires de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège.

1.2. *Bureaux responsables*

Bureau consultant

Coyne et Bellier
9, Allée des Barbanniers,
92632 GENNEVILLIERS CEDEX
FRANCE

Laboratoire

Laboratoires de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège
Institut du Génie Civil
Chemin des Chevreuils 1, Bât B52/3 Niveau +1
B-4000 Liège
Belgique

1.3. *Description du barrage de Diama*

La figure 2 reprend une photo de l'aménagement de Diama. Il comprend principalement, de la rive gauche vers la rive droite :

- une écluse,
- la culée rive gauche en batardeaux cellulaires à la cote +4,00 m,
- un ouvrage vanné comprenant 7 passes équipées de vannes secteur, avec un seuil à la cote -8,50 m, par lequel transite la totalité du débit du fleuve,
- la culée rive droite en batardeaux cellulaires à la cote +4,00 m,
- une digue de bouchure de l'ancien lit du fleuve à la cote +4,00 m.



Figure 2 : Vue aval du barrage de Diama

La crue de projet pour laquelle l'aménagement a été dimensionné est de 6 600 m³/s. Depuis la mise en service en 1987, le débit maximal à Diama a été de 2 100 m³/s.

Les protections aval du barrage contre l'érosion sont constituées d'un lit d'enrochements de poids médian P₅₀ = 60 kg (de 20 à 200 kg), de 28 m de longueur et initialement de 2 m d'épaisseur.

Une campagne de levés bathymétriques a été effectuée par l'IRD en mars 2004 à l'aval et à l'amont du barrage.

1.4. Règles de similitudes et séquences des études

Pour cette étude, le Laboratoire a réalisé une série d'essais répartis sur deux modèles réduits de tailles et de complexités différentes.

On peut rappeler ici les règles de similitudes à respecter lors de l'utilisation de modèles réduits.

Lorsque l'écoulement étudié est essentiellement gouverné par les forces de pesanteur, on réalise une étude sur modèle dans lequel les forces d'inertie et de pesanteur s'exercent dans le même rapport que dans le prototype. Cette similitude se traduit par la conservation du nombre adimensionnel de Froude entre le modèle et le prototype. La similitude de Froude est à respecter pour l'étude des écoulements à surface libre.

Si l'on impose l'échelle des longueurs géométriques L^* , la conservation du nombre de Froude Fr conduit aux relations suivantes, qui fixe l'échelle des vitesses d'écoulement V^* , l'échelle des débits Q^* et l'échelle des temps T^* .

$$\text{Soit } L^* = \frac{L_m}{L_r}, \text{ on peut déduire : } V^* = \frac{u_m}{u_r} = \sqrt{L^*}$$

$$Q^* = V^* \cdot L^{*2} = (L^*)^{5/2}$$

$$T^* = \frac{L^*}{V^*} = \sqrt{L^*}$$

La seule hypothèse formulée à ce stade est la conservation de l'accélération de la pesanteur.

Les indices « m » font référence aux caractéristiques du modèle réduit, les indices « r » à ceux du modèle réel.

Dans le cas des phénomènes d'érosion, on impose une conservation du rapport adimensionnel entre la force d'entraînement des particules et la force résistante.

La force d'entraînement exercée sur des particules de diamètre d dans un liquide de poids volumique ρ_e en mouvement à la vitesse u peut être donnée par la loi de Flamant :

$$F_e = \frac{k \rho_e \pi d^2 u^2}{8g} \text{ où } k \text{ est un facteur dépendant de la forme des grains.}$$

La force de résistance des particules sédimentées (immobiles) est fonction du poids de celles-ci et est donnée par :

$$F_r = \frac{\pi d^3 (\rho_s - \rho_e)}{6} \text{ où } \rho_s \text{ est le poids volumique des particules sédimentées.}$$

La conservation du rapport de ces deux forces conduit à la relation suivante:

$$L^* = D^* \cdot (\rho_d)^*$$

dans laquelle : D^* est l'échelle de la taille des grains des particules sédimentées,

$(\rho_d)^*$ est l'échelle des masses volumiques déjaugées de ces particules.

Enfin, les forces de frottements intervenant également dans les écoulements, il serait en principe souhaitable d'ajouter la conservation du nombre adimensionnel de Reynolds représentant le rapport entre les forces d'inertie et de frottement, soit $Re_m = Re_r$. On sait cependant aussi que le respect simultané des similitudes de Froude et Reynolds, entraîne l'impossibilité d'une étude sur modèle réduit, l'échelle déduite de cette considération étant 1/1.

On utilise donc, d'une manière générale, le respect de la similitude de Froude lors des écoulements à surface libre, ce qui est le cas ici, avec une limitation dans le choix de l'échelle, le modèle réduit devant respecter les mêmes lois de turbulence que celles observées en réalité.

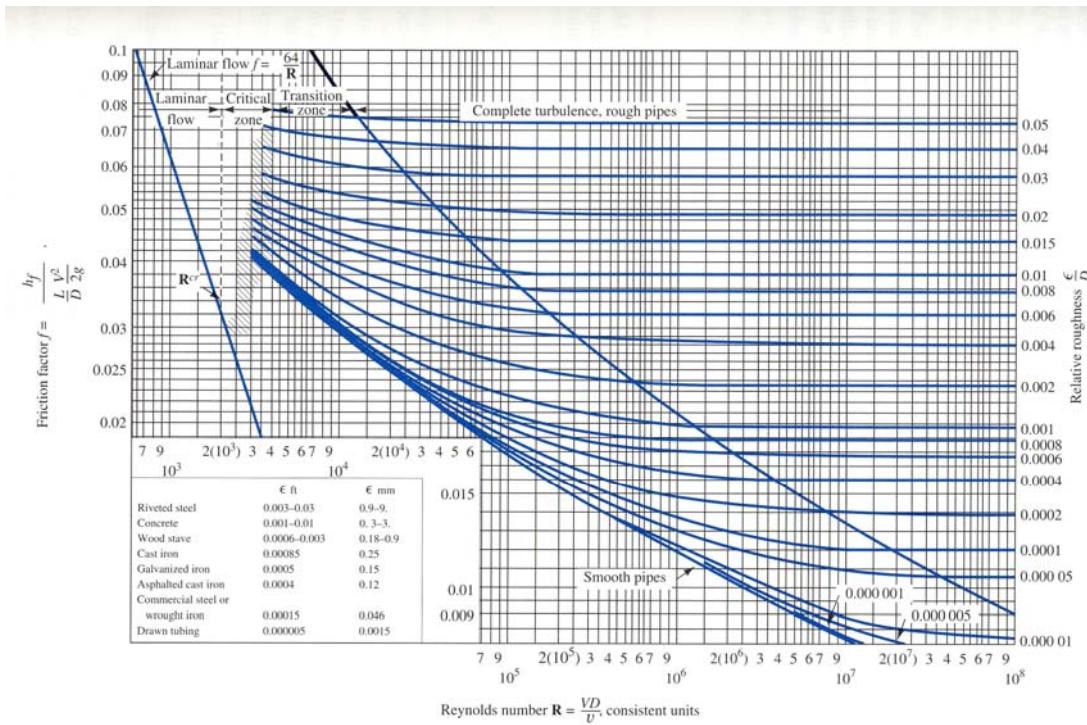


Figure 3 : Diagramme de Moody

Le diagramme de Moody repris à la figure 3 montre la variation du coefficient de frottement f en fonction du nombre de Reynolds. On peut y observer que le coefficient f est indépendant de Re pour des valeurs suffisamment élevées de ce dernier (turbulence complète) et ceci en fonction de la rugosité. Il est donc souhaitable, dans le cas étudié, de rester dans cette zone de la turbulence complète.

Le modèle complet du site appelé « modèle 3D » permettra de prendre en considération l'ensemble des écoulements de l'aménagement, et notamment de vérifier les champs de courant. Etant donné l'étendue de la surface à représenter, reprenant l'ouvrage et les constructions annexes, l'échelle du modèle 3D est le 1/105.

Ainsi qu'il a été rappelé précédemment, ce modèle 3D ne permettra pas de satisfaire complètement les critères de similitude à respecter quant aux forces de frottement et donc aussi quant à l'entraînement des sédiments. En effet le nombre de Reynolds Re de référence dans les écoulements réels (Débit de $6\ 600\ m^3/s$, et niveau moyen de +1) est de $Re_r = 4,7 \cdot 10^7$, ce qui est une turbulence complète.

Dans le modèle réduit 3D, le nombre de Reynolds est $Re_{3Dm} = 4 \cdot 10^4$, ce qui est à la limite inférieure de la turbulence.

C'est pourquoi, parallèlement à cette étude des courants sur le modèle global, il sera entrepris une étude bidimensionnelle sur un modèle appelé « modèle 2D », à échelle plus réduite soit le 1/49, consacrée exclusivement au transport des sédiments.

Dans ce cas du modèle 2D, le nombre de Reynolds est $Re_{2Dm} = 1,4 \cdot 10^5$, ce qui est turbulent et respecte la similitude de frottement.

Le modèle 2D à l'échelle 1/49 permet ainsi de réaliser :

- Un étalonnage l'évacuateur, c'est-à-dire mesure des hauteurs d'eau à l'amont du barrage en fonction du débit du fleuve Sénégal, de l'ouverture des vannes du barrage et de la hauteur d'eau de la marée en aval du barrage et donc de définir la capacité de débit de l'ouvrage.
- Un choix et un dimensionnement de la granulométrie des fondations affouillables au pied du barrage afin de reproduire la fosse d'érosion représentative de l'utilisation et du fonctionnement passé de l'ouvrage depuis sa création.
- Des essais d'érosion et de stabilité des fondations de l'ouvrage lorsque ce dernier est soumis aux nouvelles conditions d'utilisation rencontrées depuis l'ouverture de la brèche en aval de Saint-Louis en octobre 2003, mais également dans des conditions extrêmes et hypothétiques que pourrait rencontrer l'ouvrage dans un futur plus ou moins proche.

2. Modèle 2D

Le but de ce modèle est de vérifier la stabilité de l'ouvrage sous différentes conditions de débits, de cotes amont et de cotes aval.

En particulier, il permettra de dimensionner et de tester si nécessaire des solutions de renforcement de l'ouvrage.

2.1. *Réalisation du modèle*

Le modèle réduit réalisé est un modèle bidimensionnel vanné en section courante représentant l'écoulement dans une passe. Il est schématisé à la figure 4. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Modèle réduit partiel en canal à parois vitrées.
- Echelle choisie de 1/49. La largeur de la passe à modéliser est de 24,5 m (comprenant une passe et deux demi piles), la largeur du canal vitré dans lequel doit s'implanter le modèle est de 50 cm.
- Fond du canal correspondant à la cote -27 m (initialement demandée à -25 m, une marge de sécurité a été rajoutée vu la place disponible en hauteur dans le canal)
- Cote supérieure du canal correspondant à la cote +4 m.
- Débit maximal de 6600 m³/s.

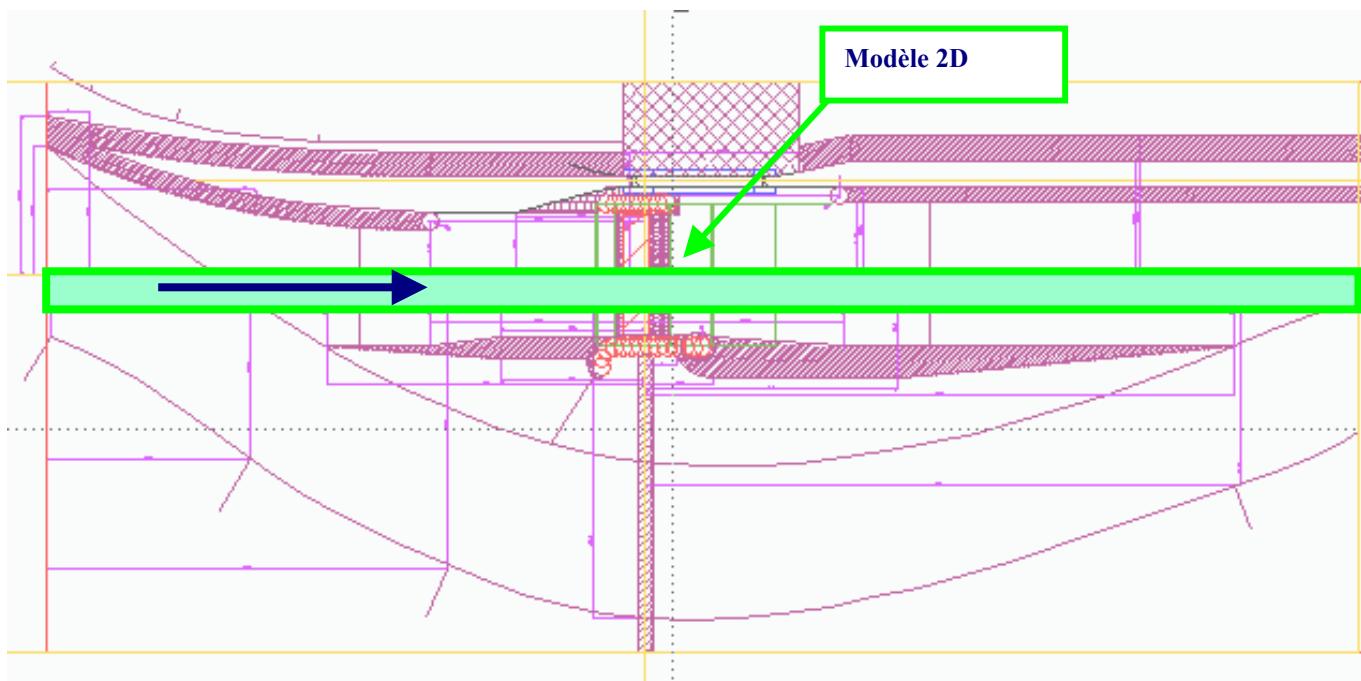


Figure 4 : Implantation du modèle 2D sur le plan général du barrage de Diama



Figure 5 a et b : Vue du radier et de la vanne segment à l'échelle 1/49



Figure 6 : Passe complète - Vue Amont



Figure 7 : Passe complète - Vue Aval



Figure 8 : Vue Latérale d'ensemble



Figure 9 : Détail du coursier

2.2. Réglage du modèle 2D

Le réglage du modèle est composé de deux parties :

- Etalonnage de l'évacuateur

Cette partie comprend un étalonnage de l'évacuateur : hauteurs d'eau à l'amont du barrage en fonction du débit du fleuve Sénegal, de l'ouverture des vannes du barrage et de la hauteur d'eau de la marée en aval du barrage et donc une caractérisation de la capacité de débit de l'ouvrage dans les nouvelles conditions d'écoulement à l'aval du barrage prévalant depuis octobre 2003.

- Réglage de la granulométrie

Par la suite un réglage de la granulométrie des fondations affouillables au pied du barrage sera entrepris afin de reproduire la fosse d'érosion représentative de l'utilisation et du fonctionnement passé de l'ouvrage depuis sa création.

2.3. Etalonnage de l'évacuateur

A partir de la collecte des informations sur le fonctionnement hydrodynamique de l'ouvrage, cette étape permet de vérifier la correspondance entre le modèle réduit et l'ouvrage réel.

Les lois des hauteurs d'eau à l'amont du barrage en fonction du débit du fleuve Sénegal, de l'ouverture des vannes du barrage et de la hauteur d'eau de la marée en aval du barrage permettent de caractériser l'écoulement. Dans cette phase d'étalonnage, le fond du modèle est fixe et est représenté par des concassés calcaires surdimensionnés afin d'éviter toute érosion. La géométrie reflète les relevés bathymétriques réalisés par l'IRD en mars 2004.

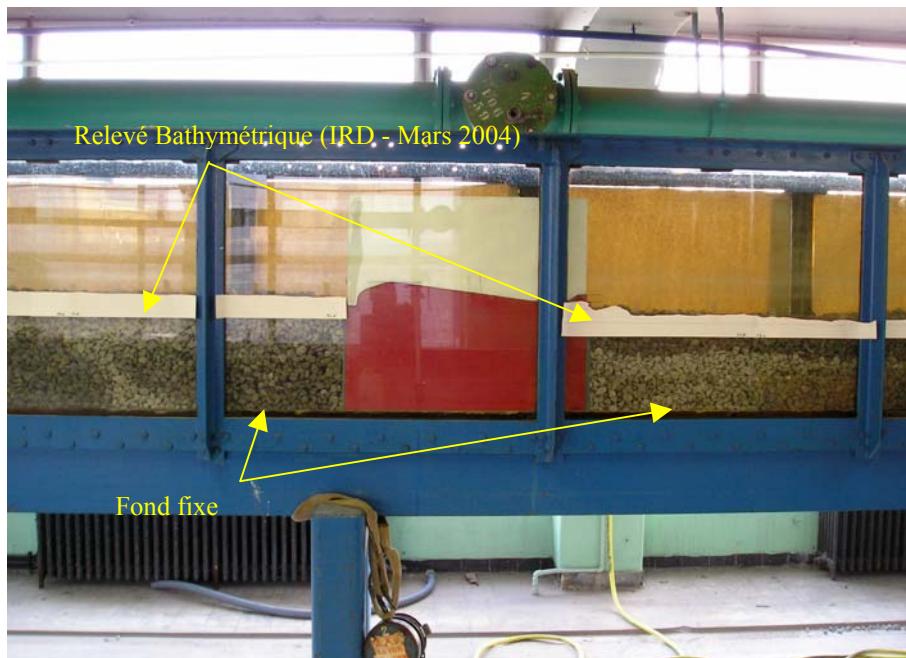


Figure 10 : Relevé Bathymétrique (IRD - Mars 2004)

2.3.1. Méthodologie

Le régime de l'écoulement est supposé permanent et l'ouverture de toutes les vannes est supposée identique. Dans ce cas les séquences de la méthode utilisée pour la prise des mesures lors de l'étalonnage sont les suivantes :

- Fixer le débit à la valeur souhaitée.
- Vanne totalement ouverte, régler le niveau aval à la valeur souhaitée (-1/0/+1) grâce à la vanne de sortie du canal.
- Un fois le niveau aval stabilisé, rechercher la valeur de l'ouverture minimale de la vanne segment qui permet d'obtenir une valeur amont proche de la valeur maximum de +4 m.
- Après chaque modification de l'ouverture de la vanne segment, attendre environ 10 à 15 min pour que les niveaux amont et aval se soient stabilisés avant de prendre les mesures.

2.3.2. Résultats de l'étalonnage

Les figures 11 à 17 ci-dessous reprennent les résultats graphiques de l'étalonnage avec :

Q = débit [m^3/s] ;

H_m = cote du niveau d'eau amont [m] ;

H_v = cote du niveau d'eau aval [m] ;

w = ouverture des vannes [m] ;

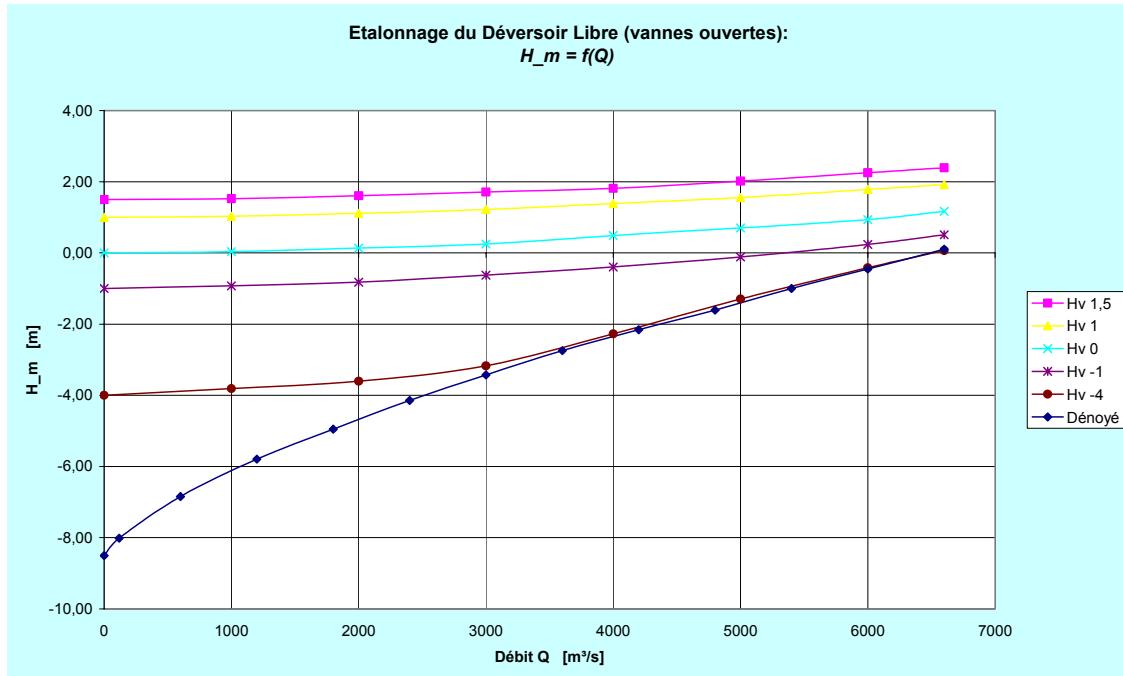


Figure 11 : Etalonnage du Déversoir Libre (vannes ouvertes)

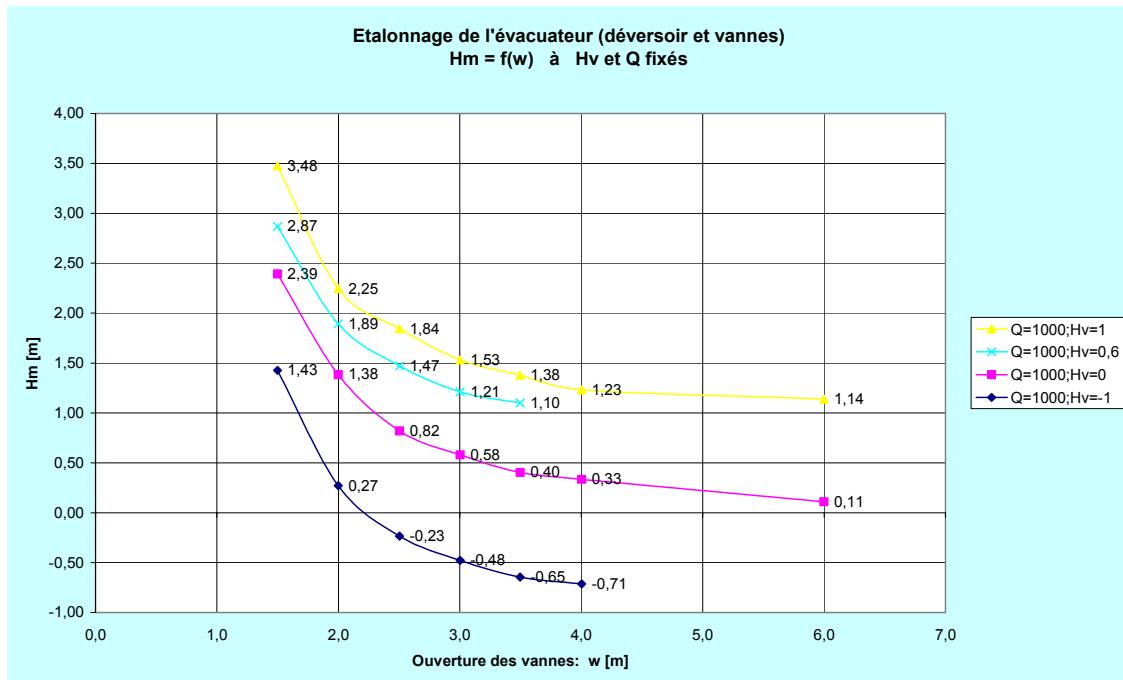


Figure 12 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

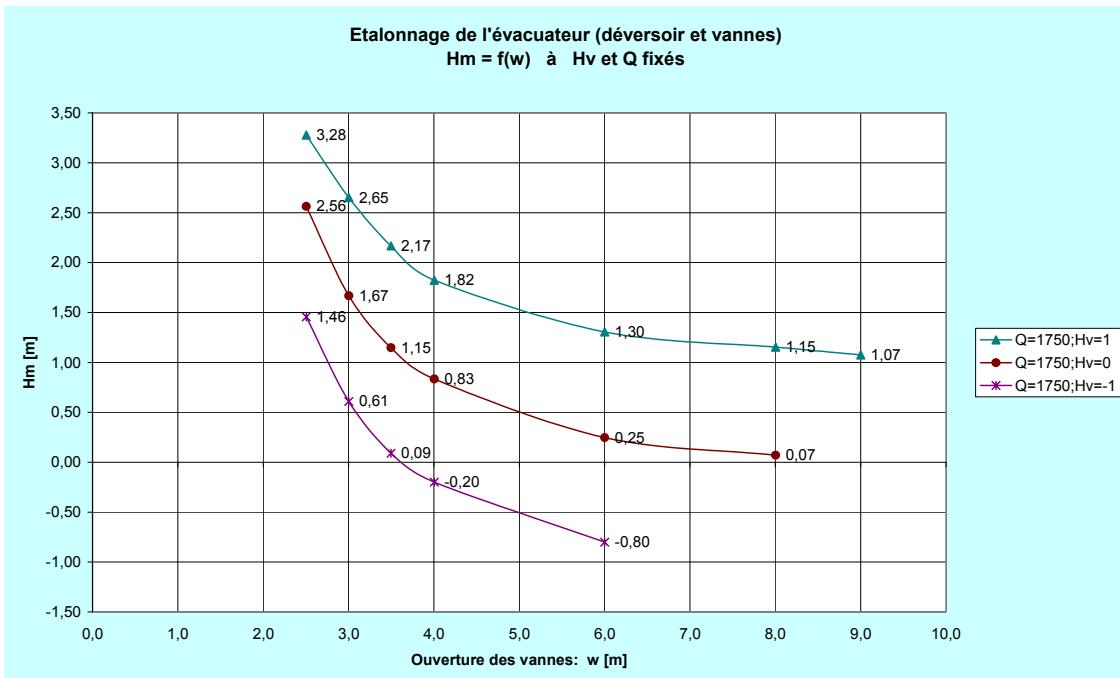


Figure 13 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 1750\text{m}^3/\text{s}$

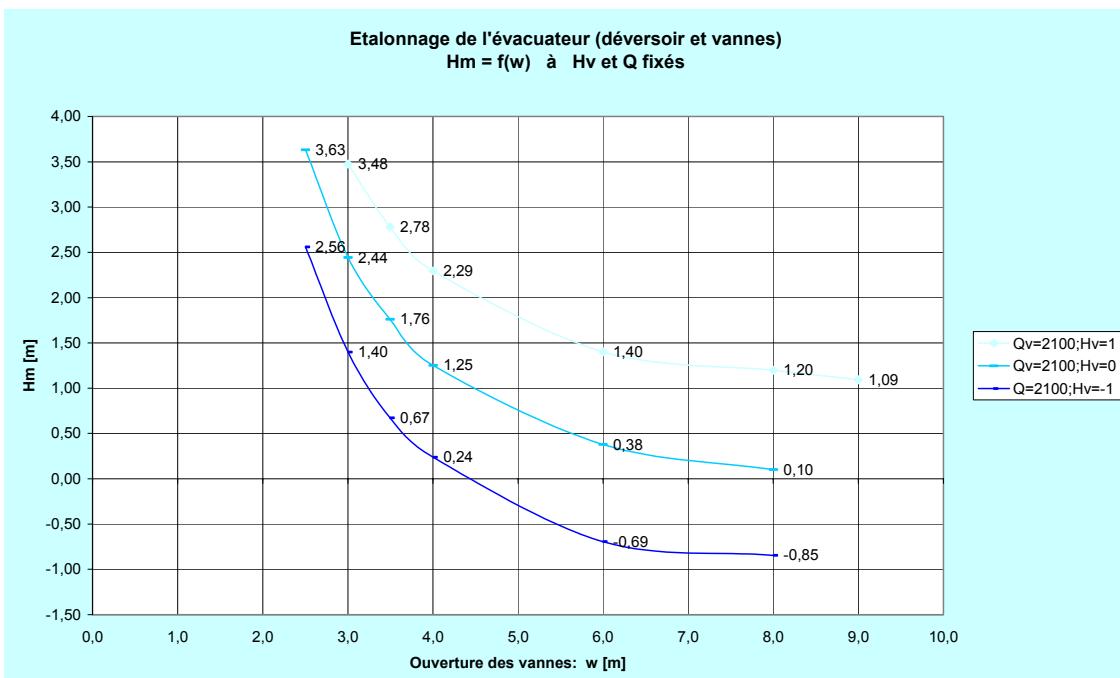


Figure 14 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 2100\text{m}^3/\text{s}$

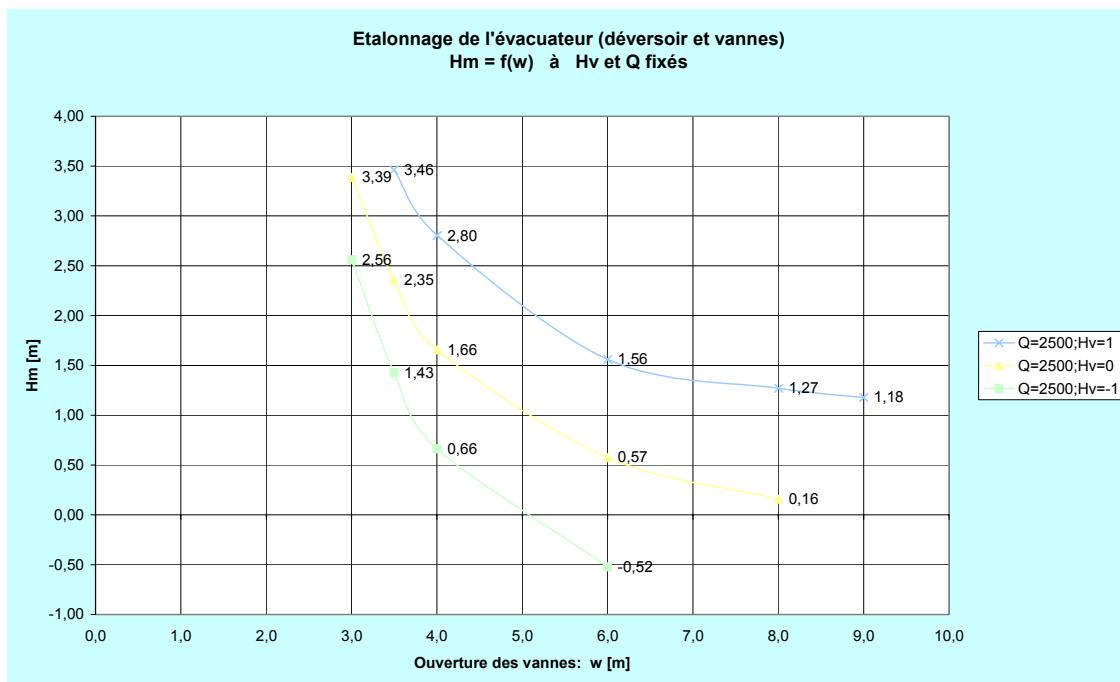


Figure 15 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 2500\text{m}^3/\text{s}$

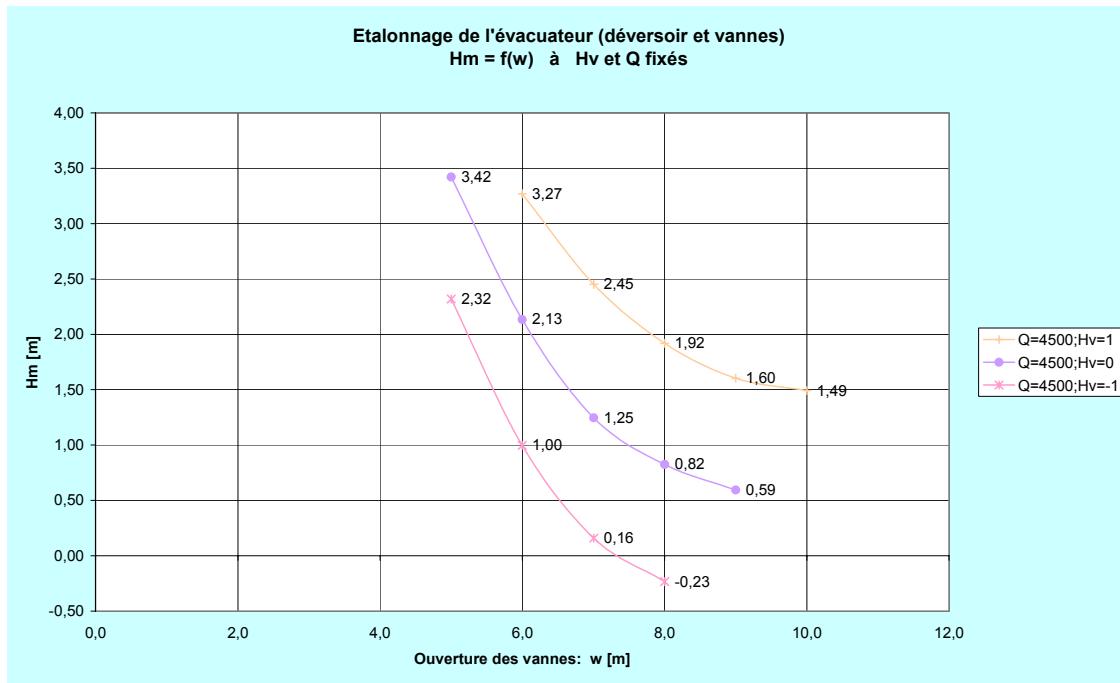


Figure 16 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 4500\text{m}^3/\text{s}$

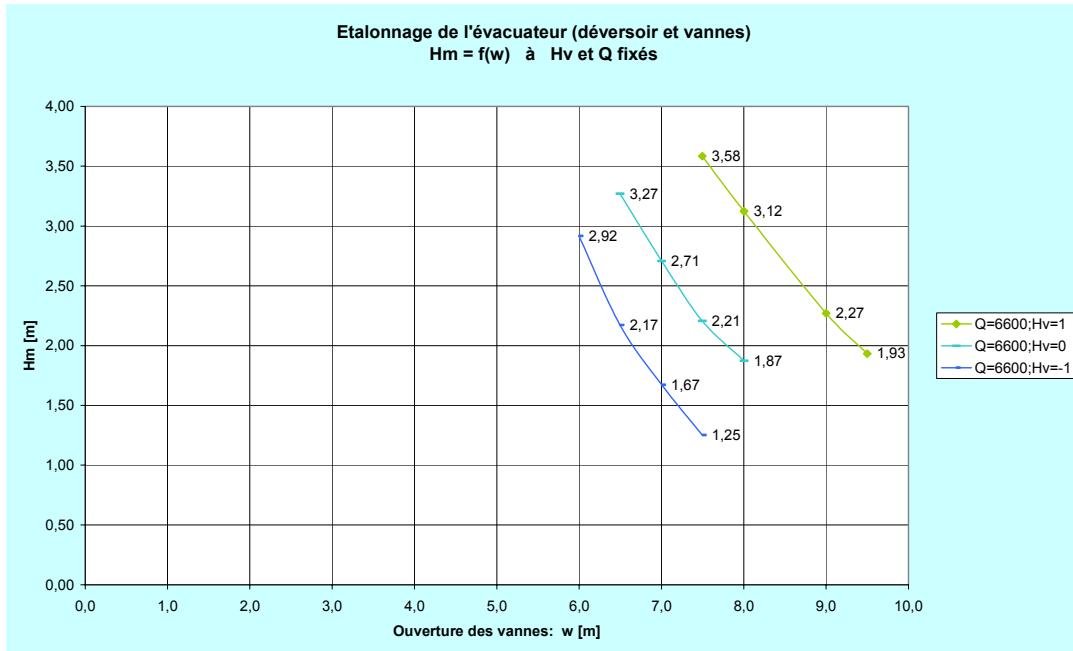


Figure 17 : Etalonnage de l'évacuateur – $Q = 6600\text{m}^3/\text{s}$

2.4. Réglage de la granulométrie

Il s'agit de simuler le fonctionnement passé de l'ouvrage de manière à retrouver la forme de la cuvette d'érosion aval actuellement observée, au besoin en calant le paramètre de la granulométrie des sables en place.
 Dans cette phase de réglage, le fond du modèle sera mobile et la géométrie initiale sera celle représentée sur les plans d'exécution du barrage.

Le profil initial utilisé pour les différents essais est le suivant :

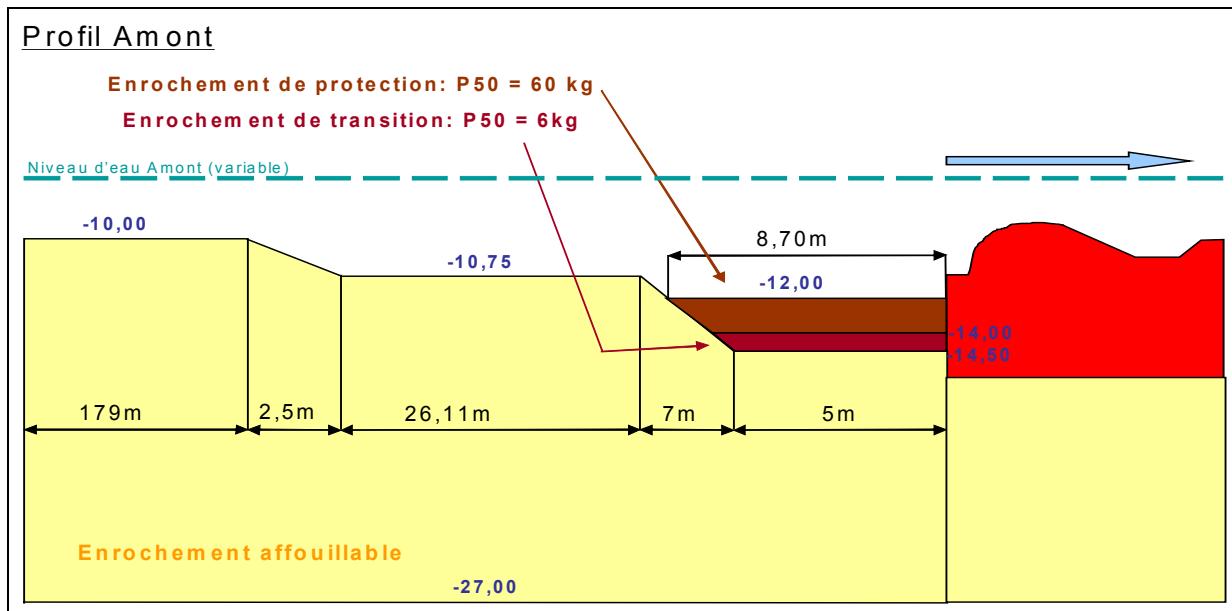


Figure 18 : Granulométrie – Profil Initial Amont

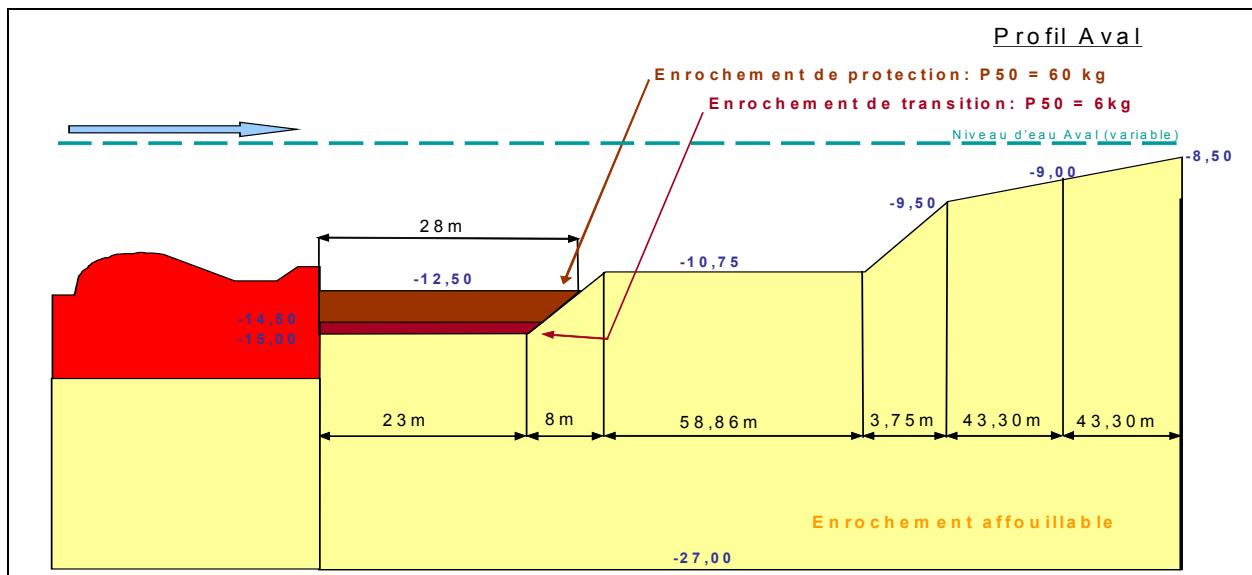


Figure 19 : Granulométrie – Profil Initial Aval

2.4.1. Evènements majeurs rencontrés à Diama

Afin de simuler le fonctionnement passé de l'ouvrage de manière à retrouver la forme de la cuvette d'érosion actuellement observée, on a testé successivement les deux jeux de paramètres suivants, représentatifs des plus forts évènements vécus par le barrage depuis sa mise en service en 1987.

Ces évènements majeurs peuvent être caractérisés de la manière suivante :

- La première catégorie concerne l'énergie dissipée lors du passage de l'ouvrage, c'est-à-dire le produit du débit multiplié par la chute. La chute étant la différence entre le niveau amont Zm et le niveau aval Zv. L'évènement maximum de cette catégorie est caractérisé par le maximum de $Q \times (Zm - Zv)$. Il a été observé le 22/09/1994 soit :

« Qénergie max » = 1740 m³/s ; Zm = +1,91 m ; Zv = +1,04 m (Energie max = 1514 m⁴/s)

- La deuxième catégorie concerne le débit. L'évènement maximum de cette catégorie a été observé le 05/10/1994 soit :

« Qdébit max » = 2100 m³/s ; Zm = +1,77 m ; Zv = +1,33 m (Energie = 924 m⁴/s)

2.4.2. Données granulométriques disponibles

Les indications fournies par le Bureau Consultant sont les suivantes:

- Matériaux vaseux de caractéristiques mécaniques extrêmement faibles compris entre le terrain naturel et la cote -10.
- Matériaux sableux, argilo-sableux et sablo-gréseux dont les densités pd varient entre 1,77 et 1,82 t/m³ en dessous de la cote -10.

Lors des essais réalisés en 1976 par Sogreah, sur un modèle réduit du barrage de Diama réalisé à l'échelle 1/30, ces matériaux sableux, argilo-sableux et sablo-gréseux ont été modélisés par des sables fins de diamètre compris entre 0,1 et 1 mm. Les matériaux vaseux ont quant à eux été modélisés par de la sciure dont le diamètre était de l'ordre de 0,4 mm.

Les enrochements de protection se présentent sous forme de deux couches distinctes:

- Une couche d'enrochement de transition ($P_{50} = 6\text{kg}$) qui s'étend sur une longueur de 5 m en amont, de 23 m en aval et sur une épaisseur de 50 cm.
- Une couche d'enrochement de protection ($P_{50} = 60\text{kg}$) qui s'étend sur une longueur de 8,7 m en amont, de 28 m en aval et sur une épaisseur de 2 m.

2.4.3. Matériaux testés

Du fait des difficultés rencontrées pour simuler le fonctionnement passé de l'ouvrage de manière à retrouver la forme de la cuvette d'érosion actuellement observée avec les données granulométriques fournies, divers matériaux ont été testés. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Matériaux Testés	Densité [t/m ³]	Granulométrie [mm]
Fondation du site à Diamma	2,77-2,82	3,0-30,0
Modèles	1 - Sable 01MER-03CB	2,7-2,8
	2 - Farine de Quartz "B.O."	2,65
	3 - Granulé Noir	1,02-1,03
	4 - Brique Pilée	2,627
	5a - Résorbant	1,922
	5b - Résorbant tamisé	1,922
	6 - Al(OH)3	2,4

Figure 20 : Résumé des caractéristiques des matériaux testés

Les caractéristiques des enrochements de protection sont les suivantes:

- Couche de transition : Concassé calcaire 2/4 mm
- Couche de protection : Concassé calcaire 6/10 mm
- Densité : 2,71 t/m³ (pour les deux couches).

La couche vaseuse a été modélisée par de la sciure lors de l'essai n°1.

Sur les photos suivantes réalisées au fur et à mesure des essais, nous pouvons observer plusieurs courbes, tracées sur la paroi vitrée du canal. Ces dernières représentent :

- En noir (et en escalier), le profil initial lors de la mise en service du barrage.
 - En rouge, le profil du relevé bathymétrique réalisé par l'IRD en mars 2004.
 - En bleu, le profil de la cuvette d'érosion observée au cours du temps le long de la paroi vitrée.
- Note : Les temps indiqués en bleu sur la paroi vitrée sont des temps de laboratoire (ils sont notés Th xx). Les temps réels sont 7 fois plus élevés vu que l'échelle des temps pour le modèle 2D est de 1/7.

2.4.4. Essai n°1 : Sable 01 MER + Sable 03 CB + Sciure calibrée

L'essai a été réalisé pendant 140 h dans la configuration « Qénergie max » et ensuite pendant 126 h dans la configuration « Qdébit max ».

❖ Observation de l'essai :

- Dans un premier temps (t_0 à t_{35h}), de grosses dunes de sciure se forment aussi bien en amont qu'en aval du barrage.
- La sciure aval se déplace inexorablement sous forme de dune et est progressivement emportée.
- Les dunes de sciure amont sont plus stables et se déplacent beaucoup moins vite.
- Une petite bosse de sciure s'est formée sur toute la largeur du canal, juste à l'endroit prévu par la courbe bathymétrique, au pied du barrage.
- A t_{140h} , la sciure aval a complètement disparu. Le sable n'a quasiment pas bougé, si ce n'est une légère avancée sur les enrochements de protection aval.
- Après 140h d'essai sous la condition « Qénergie max » et 126h d'essai sous la condition « Qdébit max », l'érosion du sable a modifié la pente du profil initial des fondations mais n'a pas permis d'atteindre la courbe bathymétrique espérée.
- Le sable qui s'accumule sur la zone des enrochements de protection remonte maintenant jusqu'au pied du radier.

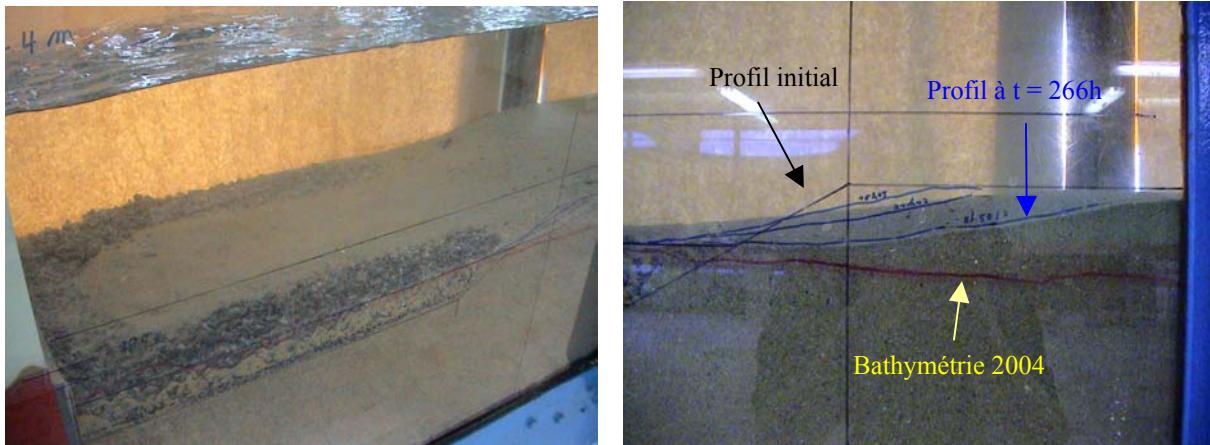


Figure 21 a et b : Sable 01MER et 03CB – Durée de l'essai 266h

❖ Conclusion de l'essai :

- La sciure modélisant la couche vaseuse subit une forte érosion et est très rapidement emportée dans son intégralité. Selon les relevés bathymétriques, cette couche vaseuse initialement comprise entre le terrain naturel et la cote -10 m, depuis bien longtemps été emportée vu que la courbe bathymétrique aval se situe dans sa grande majorité sous cette même cote -10.
- La sciure ne sera dès lors plus modélisée dans les essais à venir.
- Le sable modélisant le fond mobile n'est pas érodé. En effet, après 140 h à « Qénergie max » et 126 h à « Qdébit max », la courbe d'érosion ne se rapproche pas significativement de la cuvette d'érosion souhaitée. Les essais doivent donc être poursuivis avec un matériau plus érodable.

Les enrochements de protections attenants au barrage n'ont subit aucun déplacement significatif ni en amont, ni en aval de ce dernier. Les relevés bathymétriques confirmant cette situation, on gardera ces enrochements de protection tels quels lors des prochains essais.

2.4.5. Essai n°2 : Farine de Quartz « B.O. »

Essai réalisé sous la condition « Qdébit max » pendant une période de 133 h.

❖ Observation de l'essai :

- Dans un premier temps, l'érosion se produit pour réduire la pente qui survient juste après la zone des enrochements de protection.
- La farine de quartz remonte légèrement vers le pied du barrage en s'étendant sur les enrochements de protection.
- Les grains de farine, bien qu'ils se déplacent également en roulant les uns sur les autres, se font périodiquement arracher du fond du canal par des petits tourbillons et sont ensuite en grande partie emmenés vers l'aval. Une partie d'entre eux se déposent à nouveau et sédimentent au pied du barrage.

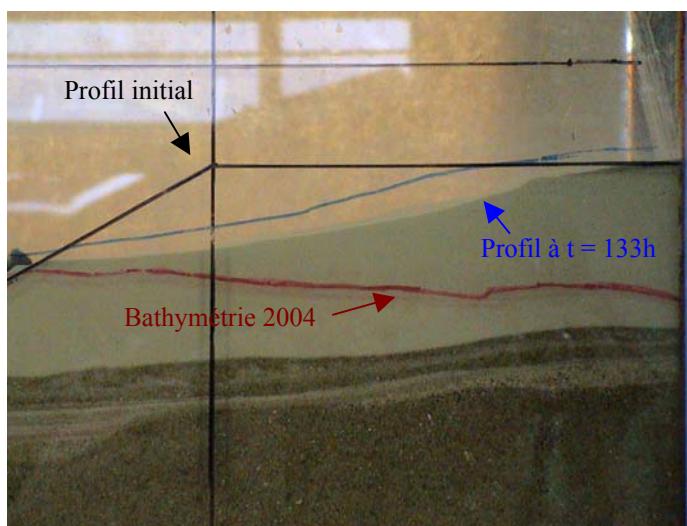


Figure 22 : Farine de Quartz « BO » – Durée de l'essai 133 h

❖ Conclusion de l'essai :

Malgré la très faible dimension des grains de cette farine de quartz, l'érosion attendue pour rejoindre la courbe bathymétrique n'est pas suffisante.

2.4.6. Essais n°3 à 5 : Granulé Plastique Noir, Brique Pilée, Résorbant

Les essais ont été poursuivis avec des matériaux plus érodables tels que des granulés de plastique noir, de la brique pilée et du résorbant dont les caractéristiques sont reprises à la figure 20.

❖ Conclusion des essais :

Malgré les caractéristiques des matériaux, l'érosion attendue pour rejoindre la courbe bathymétrique n'est pas suffisante.

2.4.7. Essai n°6 : Hydroxyde d'aluminium Al(OH)₃

Les caractéristiques du matériau sont reprises à la figure 20. Les essais ont été réalisés pendant une période de 154 heures, dans une configuration de débit maximum et avec une charge correspondante à la situation d'énergie maximum soit :

$$Q = 2100 \text{ m}^3/\text{s} ; \\ H_v = +1,04 \text{ m} ; H_m = +1,91 \text{ m}$$

Les figures suivantes montrent l'évolution des érosions :



Figure 23 a et b : Erosion du lit aval dans la zone des enrochements de protection et immédiatement après - Al(OH)₃: T=70 h



Figure 24 a et b : Erosion du lit aval - suite en aval de la figure 23 - et détail vue en plan de la zone de protection - Al(OH)₃: T=70 h

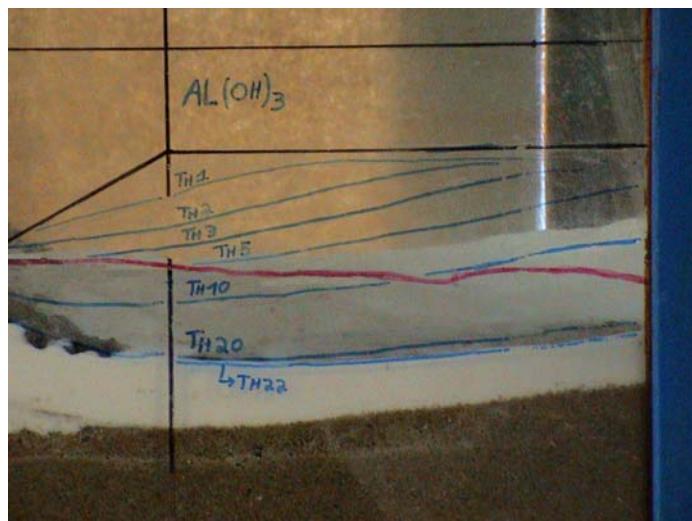


Figure 25 : Erosion du lit aval juste après la zone d'enrochemen de protection $\text{Al}(\text{OH})_3$: T=154 h

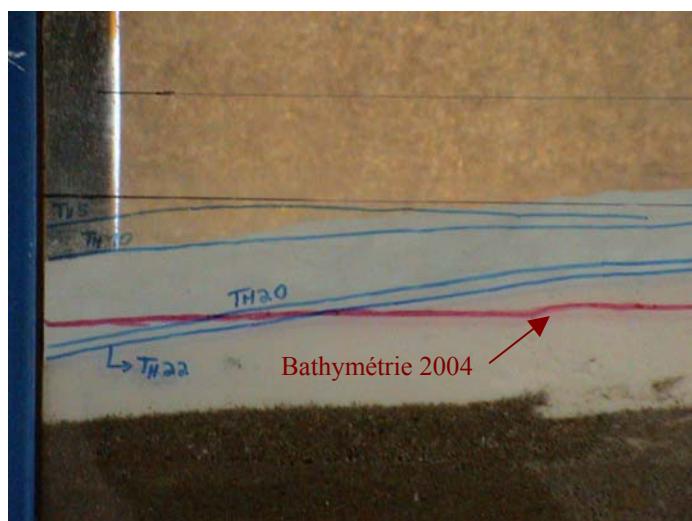


Figure 26 : Erosion du lit aval - suite en aval de la figure 25 - $\text{Al}(\text{OH})_3$: T=154 h



Figure 27 : Erosion du lit aval vue générale de profil $\text{Al}(\text{OH})_3$ T=154 h

❖ Observation de l'essai :

Après 154 heures d'essai, nous avons pu constater une cuvette d'érosion telle que :

Contre la paroi vitrée du canal,

Au pied de la zone d'enrochement de protection (31,4 m en aval du radier), le fond mobile est creusé de 4,56 m par rapport à sa configuration initiale, soit 2,16 m plus bas que la courbe bathymétrique.

Au minimum de la cuvette d'érosion (33,8 m en aval du radier), le fond mobile est creusé de 4,70 m part rapport à sa configuration initiale, soit 2,06 m plus bas que la courbe bathymétrique.

La cuvette d'érosion rejoint la courbe bathymétrique à 51,8 m en aval du radier et est creusée de 2,35 m part rapport à sa configuration initiale.

A une distance de 68,1 m en aval du radier, le fond mobile est creusé de 1,02 m part rapport à sa configuration initiale, soit 0,98 m plus haut que la courbe bathymétrique.

Au milieu du canal,

Au minimum de la cuvette, le fond mobile est creusé de 3,18 m, soit 0,49 m plus bas que la courbe bathymétrique.

A une distance de 68,1 m en aval du radier, il n'y a pas d'érosion significative au milieu du canal.

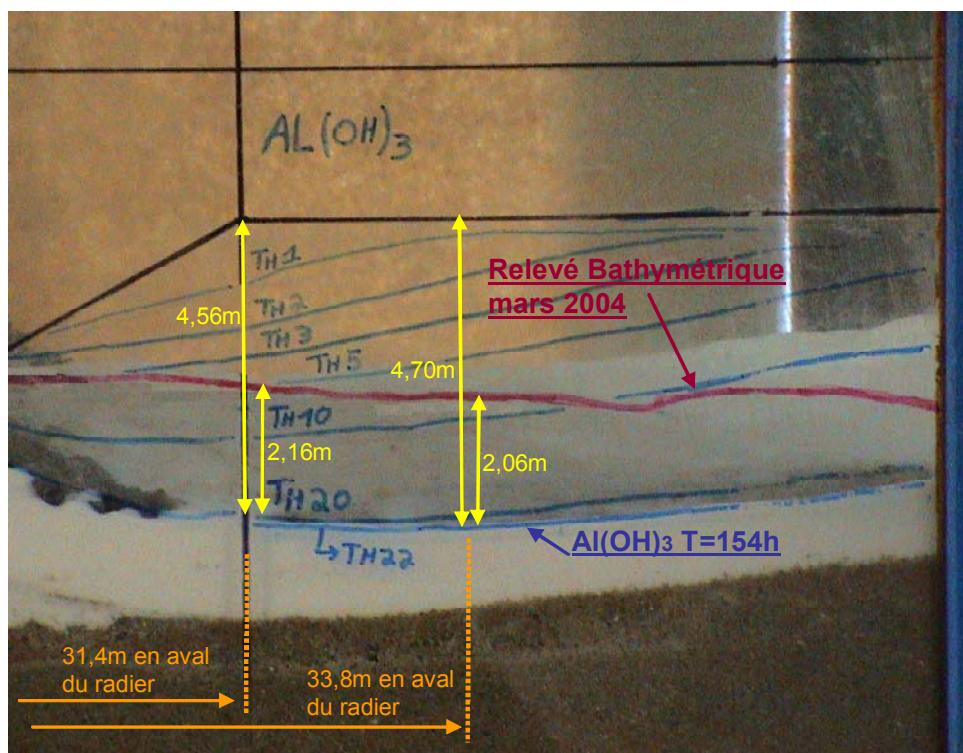


Figure 28 : Erosion de l' Al(OH)_3 et relevés bathymétriques sur la paroi vitrée – Comparaison

❖ Conclusion de l'essai :

Le profil d'érosion obtenu au centre du canal avec l'hydroxyde d'aluminium Al(OH)_3 rejoint la courbe bathymétrique souhaitée.

2.4.8. Lignes de courant en sortie de l'évacuateur

La figure 29 et 30 ci-dessous illustrent le phénomène de rouleaux qui se créent à la sortie de l'évacuateur. Les trois rouges de la figure 29 sont des petits bouts de laine qui ondulent autour d'un axe sous l'effet du courant.



Figure 29 : Champ de vitesse en sortie de vanne

On observe distinctement l'existence d'un courant inverse dans le fond du canal. Ce courant inverse est la conséquence du rouleau créé par le ressaut de l'évacuateur comme le montre la figure 30.

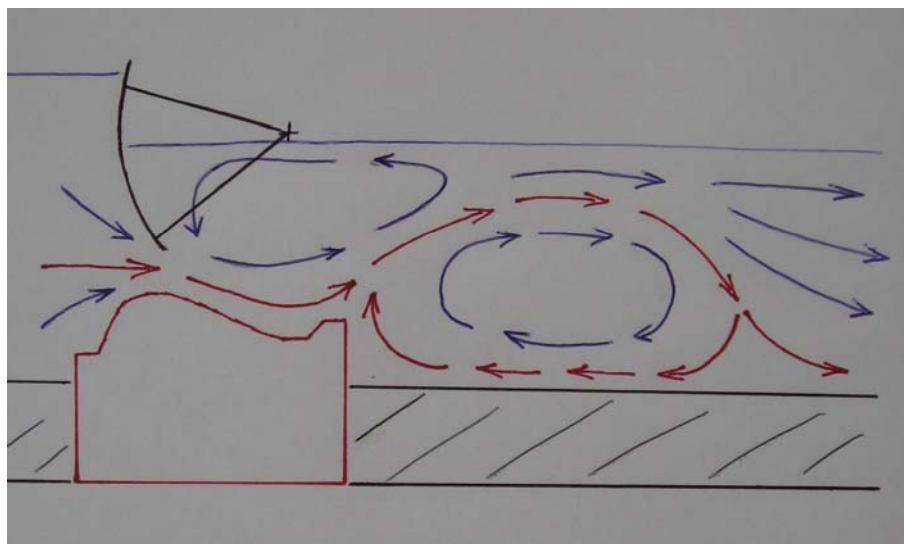


Figure 30 : Schéma du ressaut et du rouleau en sortie de vanne

2.5. Conclusion des essais granulométriques

L'hydroxyde d'aluminium Al(OH)3 utilisé lors de l'essai 6 nous a permis de simuler *le fonctionnement passé* de l'ouvrage et de retrouver la forme de la cuvette d'érosion aval actuellement observée à Diam.

L'hydroxyde d'aluminium sera donc le matériau retenu pour la suite de l'étude. Il nous permettra de simuler *le fonctionnement actuel* de l'ouvrage et de vérifier sa stabilité pour les nouvelles conditions d'exploitation établies depuis l'ouverture de la brèche en octobre 2003.

Compte Rendu N°2

Essais d'Erosion sur Modèle Réduit 2D Stabilité du barrage de Diama

1. Introduction

Les premiers essais réalisés sur le modèle 2D en canal vitré (voir compte rendu n°1), nous ont permis de déterminer le type et la granulométrie des enrochements de protection et du fond affouillable représentatifs de ceux présents à Diam.

Pour rappel :

Couche de protection :

Enrochements de poids médian $P_{50} = 60 \text{ kg}$ → Concassé calcaire 6/10 mm.

Couche de transition :

Enrochements de poids médian $P_{50} = 6 \text{ kg}$ → Concassé calcaire 2/4 mm.

Fond affouillable :

Fond affouillable argilo-sableux et sablo-gréseux

→ Hydroxyde d'Aluminium Al(OH)_3 , densité = 2,4 t/m³, granulométrie de 0 à 192 µm.

L'étalonnage de l'évacuateur et les matériaux utilisés sur le modèle 2D ayant été validés, nous pouvons maintenant procéder aux essais de stabilité.

Il s'agit de simuler le fonctionnement de l'ouvrage de manière à vérifier sa stabilité pour les nouvelles conditions d'écoulement établies depuis l'ouverture de la brèche en octobre 2003 et le cas échéant de définir les protections supplémentaires nécessaires.

Sur la figure ci-dessous, le profil de la cuvette d'érosion actuellement observée à Diama (relevé IRD de mars 2004) est représenté en rouge. Le fond du canal, en blanc, est composé de matériau affouillable « Hydroxyde d'Aluminium ». Au centre du canal, il décrit après une semaine d'érosion au débit maximum jamais rencontré à Diama ($2100 \text{ m}^3/\text{s}$), un profil comparable au relevé bathymétrique de 2004.

En zone 1, on observe une accumulation des sédiments comme prévu par le relevé bathymétrique.

En zone 2, on observe une érosion légèrement plus importante juste en aval de la zone protégée par les enrochements de protection.

En zone 3, l'érosion y est légèrement plus faible.

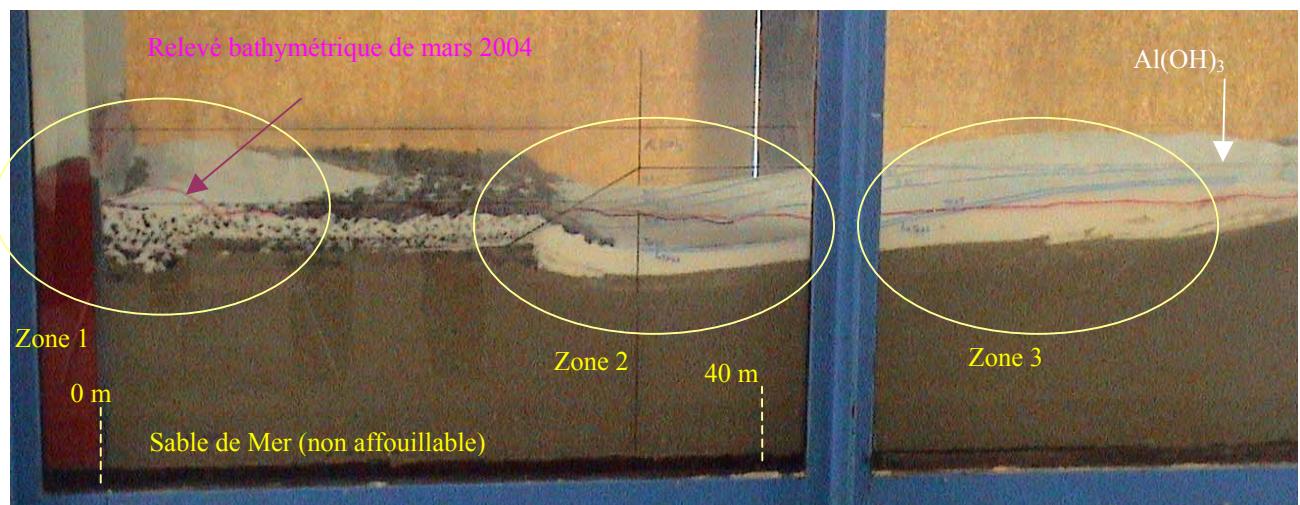


Figure 31 : Comparaison entre le profil de la cuvette d'érosion actuellement observée à Diama et celui obtenu dans le modèle 2D après les essais granulométriques.

2. But de l'étude

Afin de simuler le fonctionnement de l'ouvrage dans les nouvelles conditions d'écoulement établies depuis l'ouverture de la brèche en octobre 2003, et de vérifier ainsi la stabilité de celui-ci, une série d'essais dont les paramètres sont repris ci-dessous a été réalisée.

3. Programme des essais

- Plage de débit variant de 500 à 6600 m³/s : 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4600 et 6600 m³/s.

Les essais sont réalisés en respectant l'ordre des débits croissants afin de suivre au fur et à mesure l'évolution de la cuvette d'érosion lorsque celle-ci est soumise à des conditions de plus en plus contraignantes.

- Hauteur d'eau amont = +1,5 m IGN

Pour chacun des débits, et tant que la valeur de ceux-ci le permet, le niveau amont est maintenu à la cote +1,5 m IGN par un réglage adéquat de l'ouverture des vannes. Pour les débits de 4600 et de 6600 m³/s, l'ouverture des vannes est totale et le niveau amont s'établit en fonction du débit et de la hauteur aval.

- Le niveau aval est fonction du débit et est déterminé par la courbe de tarage d'équation, fournie par le Bureau d'étude :

$$Q = \left[\frac{Hv + 1,5}{0,0477} \right]^{1/0,5}, \text{ ce qui nous donne :}$$

Débit (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	3000	4600	6600
Niveau Aval (m IGN)	-0,43	+0,02	+0,36	+0,65	+1,11	+1,73	+2,37

Chaque essai a été réalisé selon une durée de 24 heures, ce qui équivaut à une crue réelle d'une semaine.



Figure 32: Configuration initiale des essais d'érosion

4. Essais

4.1. Relevé topographique de la cuvette d'érosion :

A la fin de chaque essai, nous effectuons un relevé topographique de la cuvette d'érosion au moyen d'un distance mètre laser. Pour repérer les différents points à mesurer, nous utilisons un support de référence qui se déplace sur l'armature métallique graduée du canal vitré. La figure 33 représente le maillage de la zone de mesure.

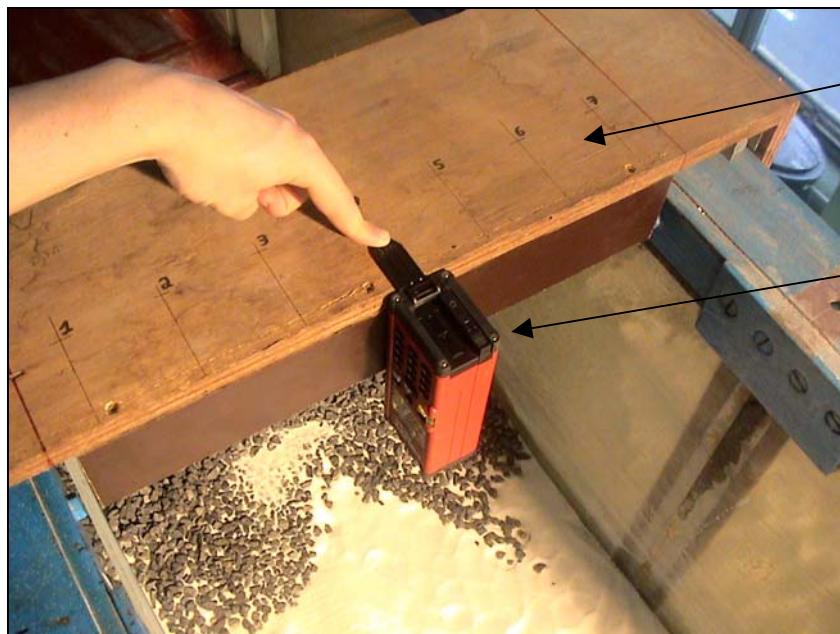


Figure 33: Mesure de la fosse d'érosion au laser

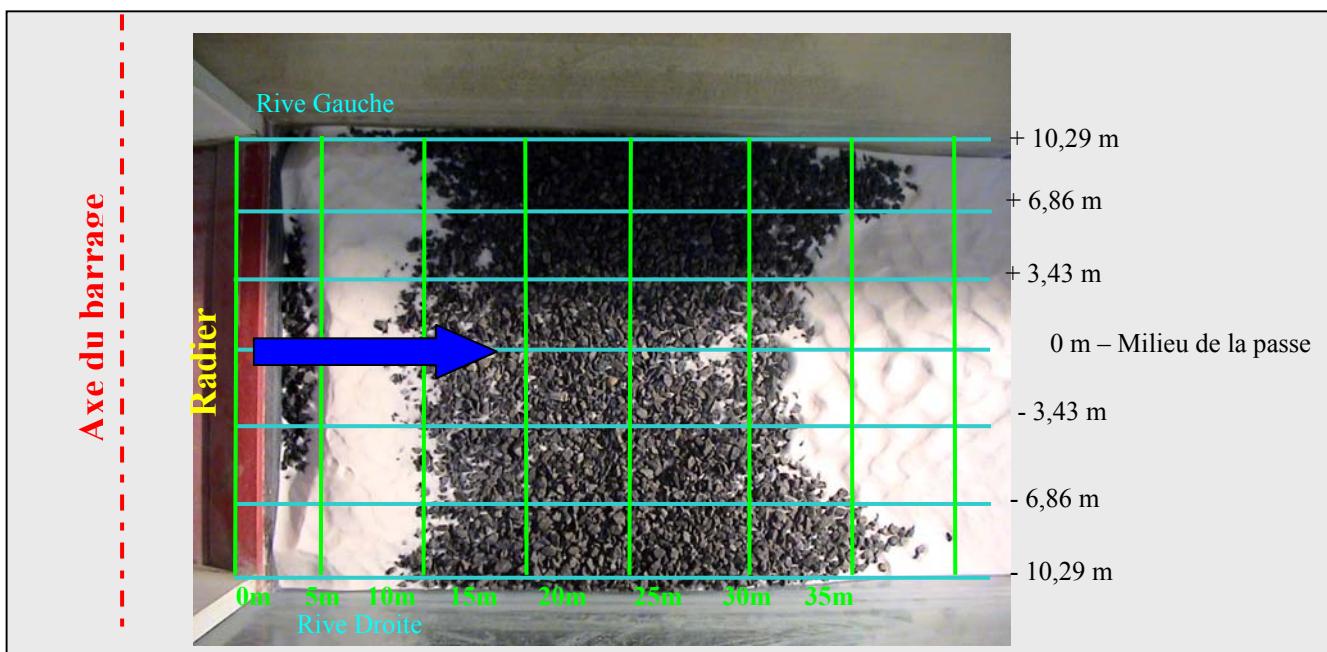


Figure 34: Quadrillage de la fosse d'érosion - Points de mesures des relevés topographiques

4.2. Résultats

4.2.1. Débit 500 m³/s

Niveau amont Zm = 1,5 m IGN, Niveau aval Zv = -0,43 m IGN.

Lors de ce premier essai, le débit est trop faible (4,2 l/s sur le modèle) pour être correctement modélisé pendant une période prolongée. L'érosion du fond affouillable pour ce débit étant par ailleurs non significative, nous ne proposons aucun résultat.

4.2.2. Débit 1000 m³/s

Niveau amont Zm = 1,5 m IGN, niveau aval Zv = +0,02 m IGN.

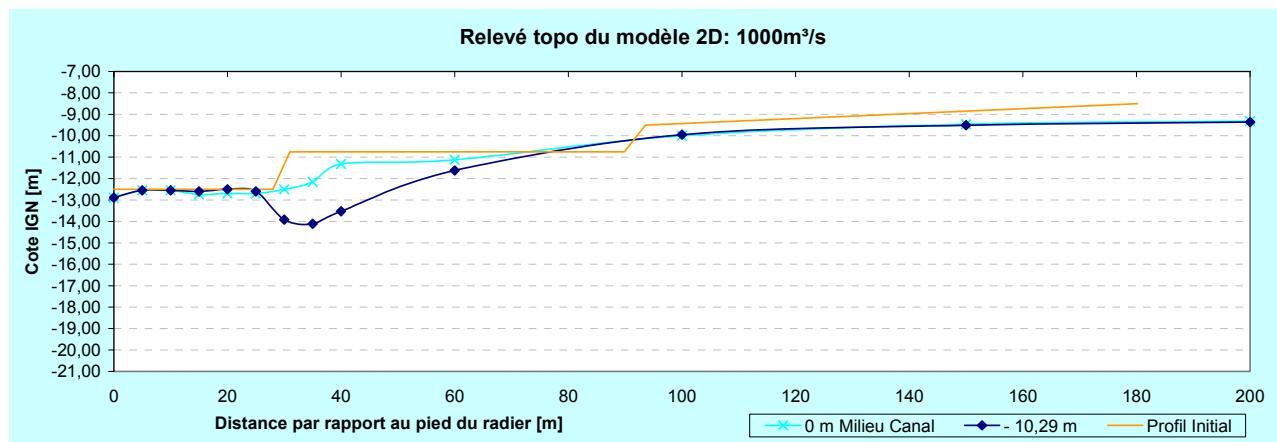


Figure 35: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

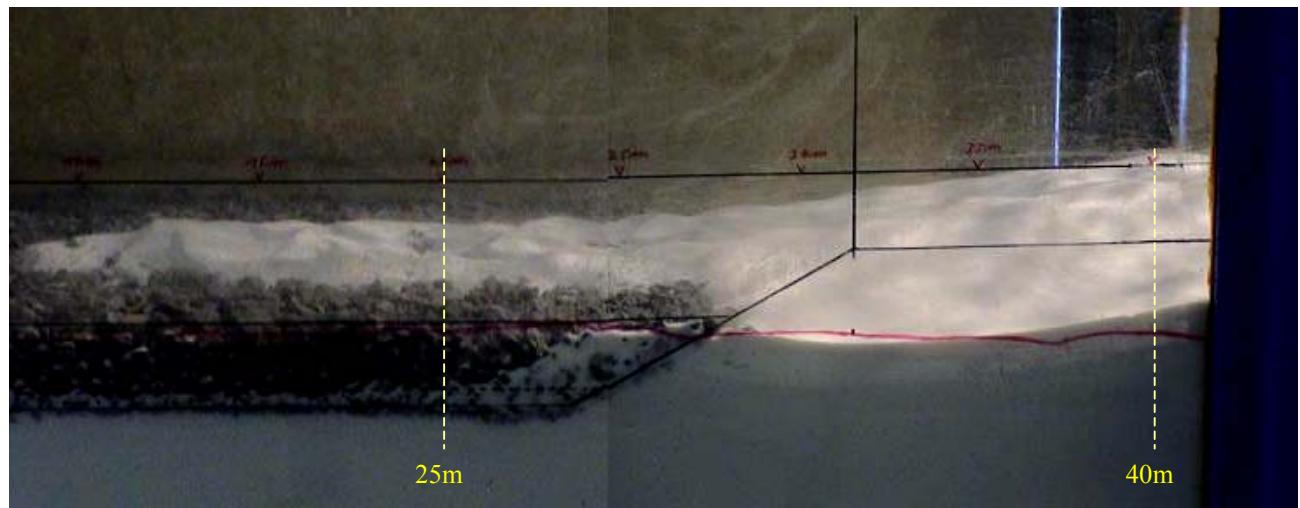


Figure 36: Cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite



Figure 37: Cuvette d'érosion pour $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval

4.2.3. Débit $1500 \text{ m}^3/\text{s}$

Niveau amont $Z_m = 1,5 \text{ m}$ IGN, niveau aval $Z_v = +0,36 \text{ m}$ IGN.

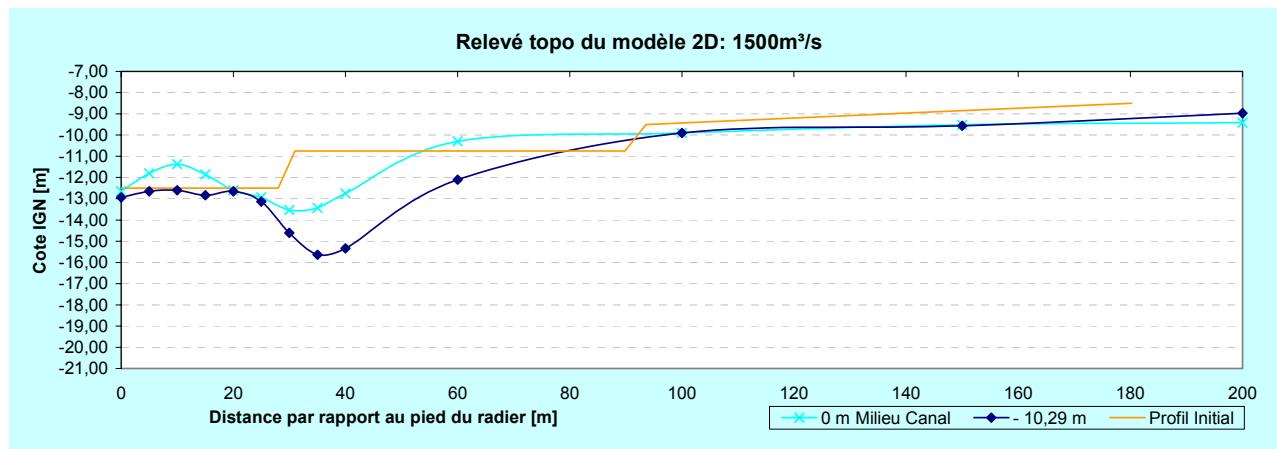


Figure 38: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$

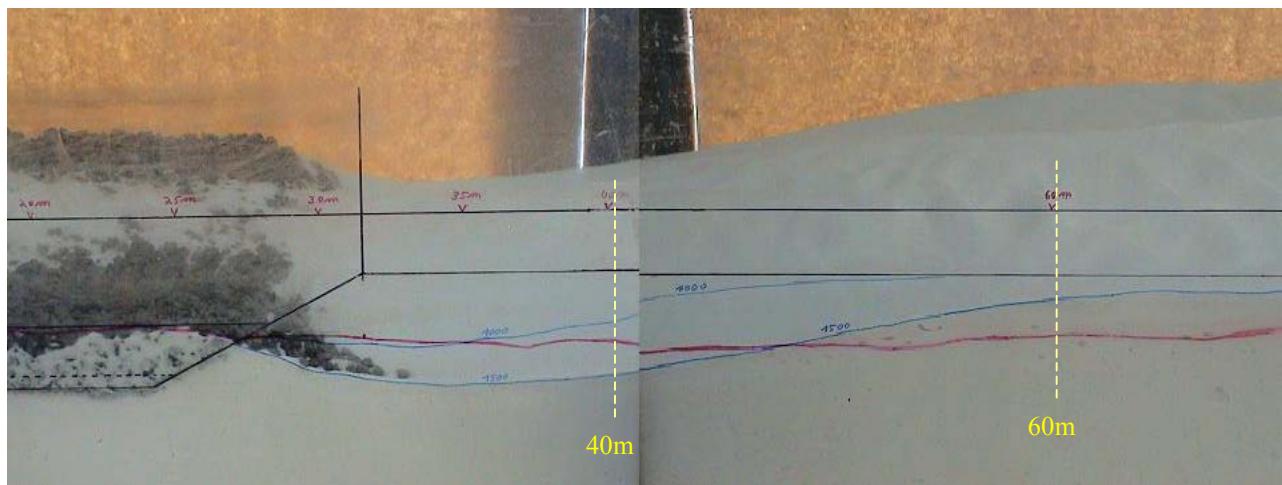


Figure 39: Cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite

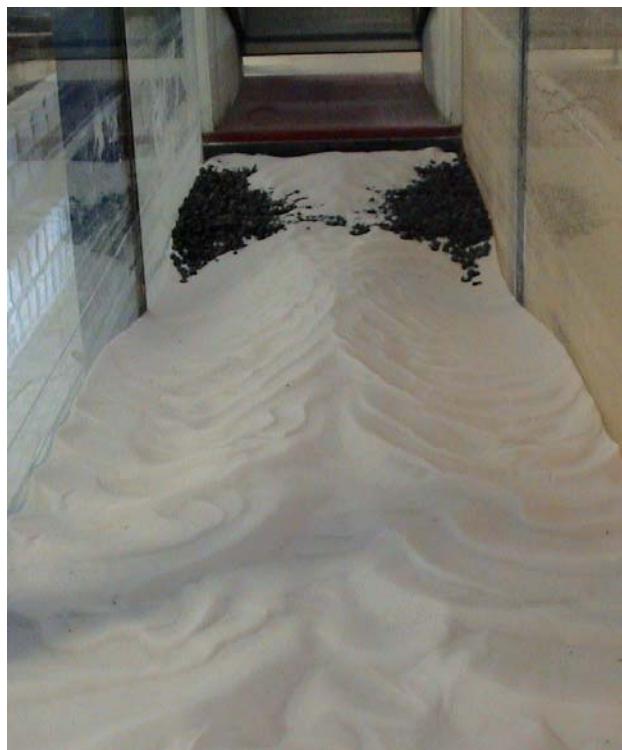


Figure 40: Cuvette d'érosion pour $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval

4.2.4. Débit 2000 m³/s

Niveau amont Zm = +1,5 m IGN, niveau aval Zv = +0,65 m IGN.

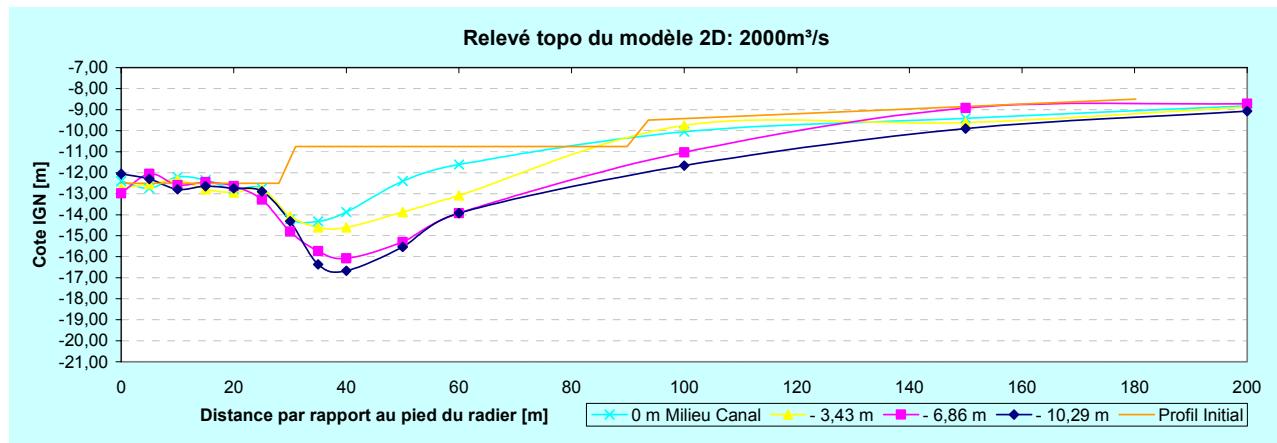


Figure 41: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour Q = 2000 m³/s

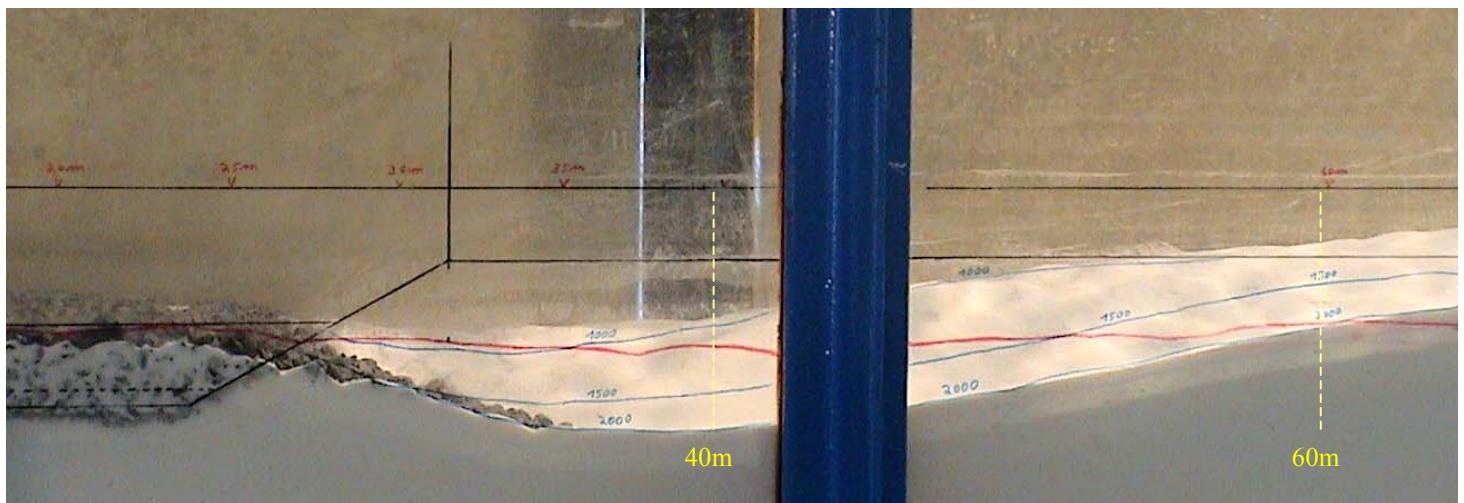


Figure 42: Cuvette d'érosion pour Q = 2000 m³/s pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite



Figure 43: Enrochement de protection pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 44: Cuvette d'érosion pour $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval

4.2.5. Débit 3000 m³/s

Niveau amont Zm = +2,46 m IGN, niveau aval Zv = +2,37 m IGN

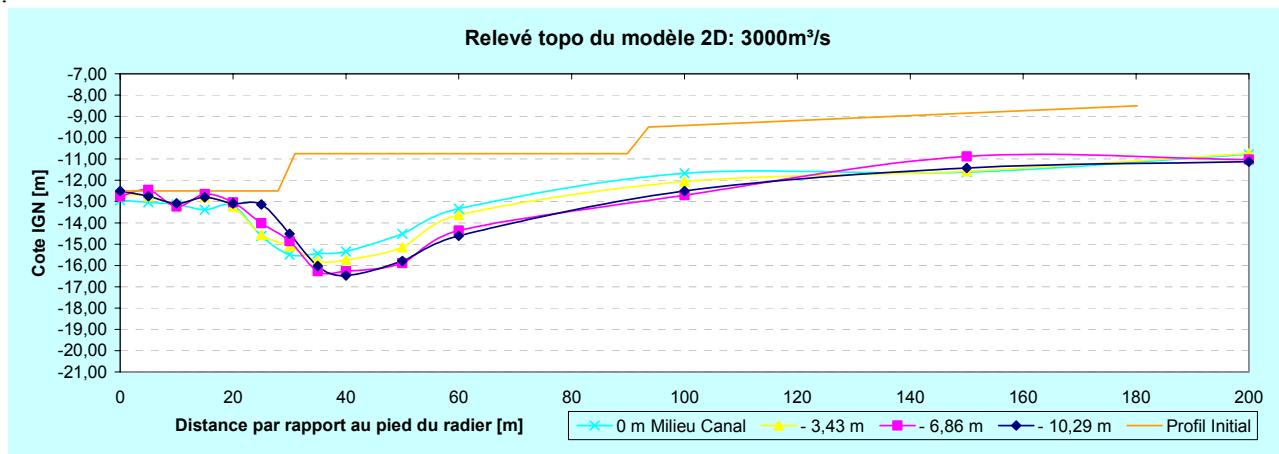


Figure 45: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$

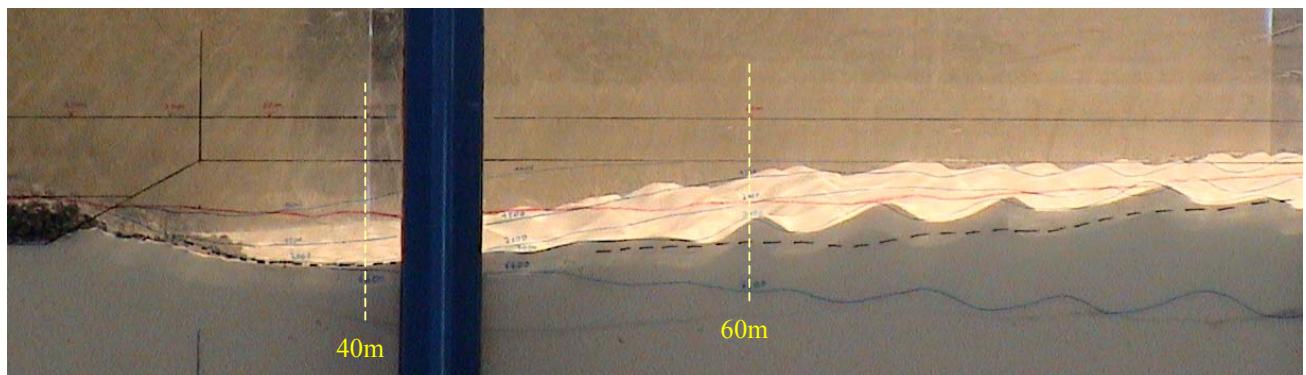


Figure 46: Cuvette d'érosion pour $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite

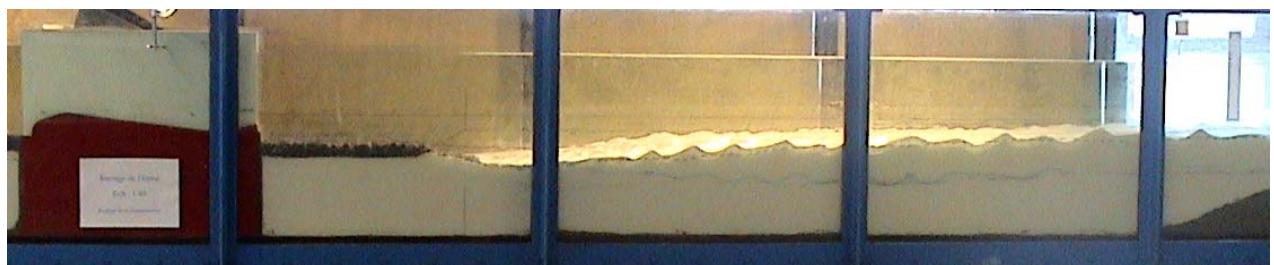


Figure 47: Cuvette d'érosion après $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue d'ensemble de profil

4.2.6. Débit 4600 m³/s

Niveau amont Zm = +2,46 m IGN, niveau aval Zv = +2,37 m IGN.

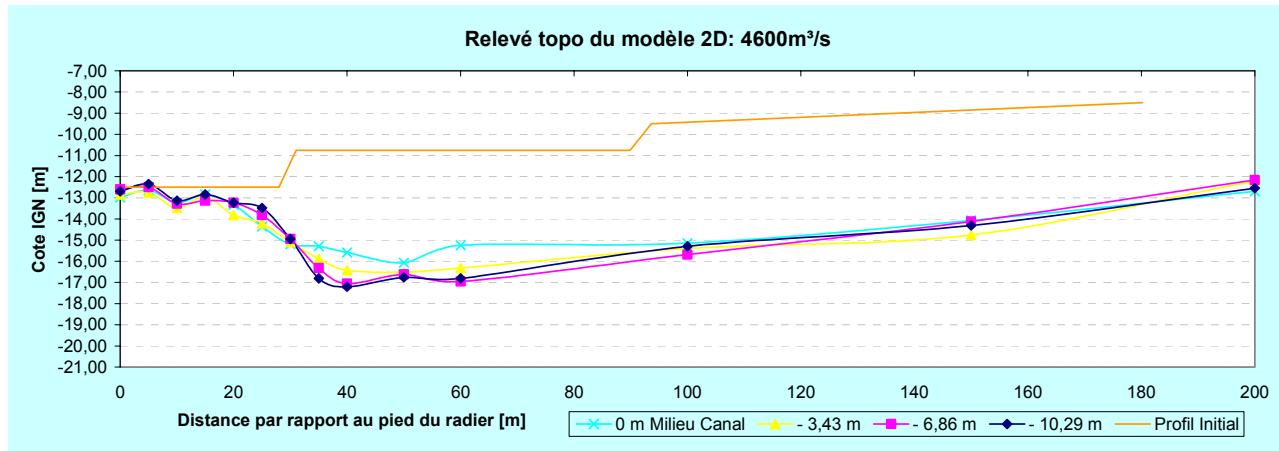


Figure 48: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$

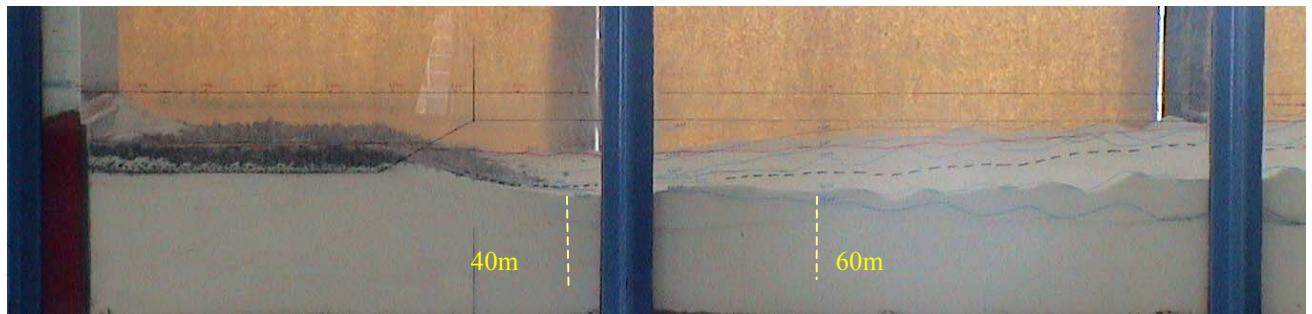


Figure 49: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite



Figure 50: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval

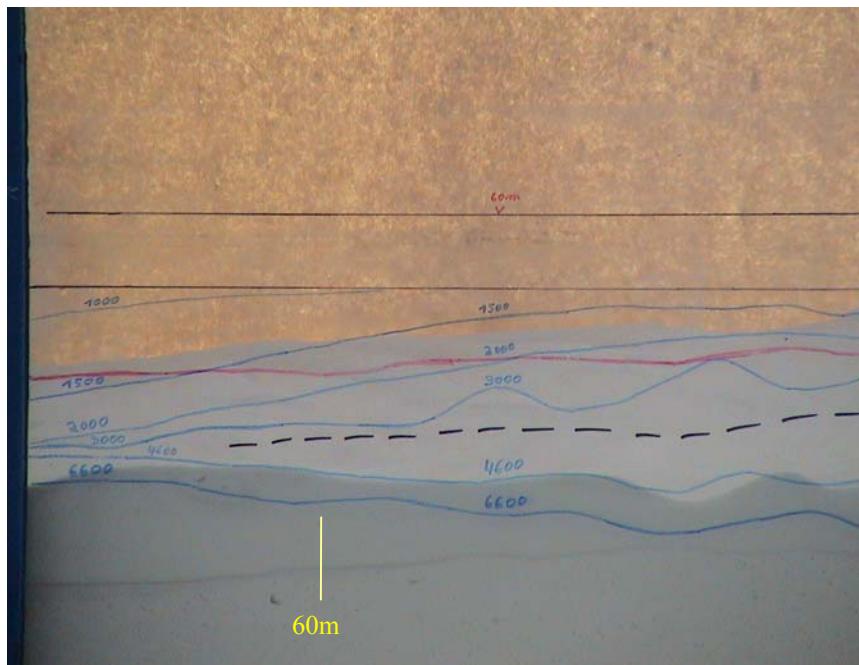


Figure 51: Cuvette d'érosion après $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue de détail au 60m

4.2.7. Débit 6600 m³/s

Lors de cet essai à 6600 m³/s, deux phénomènes d'érosion distincts se sont succédés au cours du temps.

- Dans une première phase, la cuvette d'érosion en hydroxyde d'aluminium s'est érodée petit à petit comme lors des essais précédents. Elle est cependant plus profonde vu l'importance du débit.
- Dans une deuxième phase, le sable de mer présent dans le canal en amont du barrage, et qui jusqu'alors était considéré comme fond fixe pour les débits plus faibles, s'est mis en mouvement. Charrié de l'amont vers l'aval, le sable est passé de part et d'autre du barrage et est venu remblayer une partie de la cuvette d'érosion.

Le relevé topographique de la figure 52 a été établi alors qu'une partie de la cuvette avait déjà été remblayée par le sable en question.

Niveau amont Zm = +2,46 m IGN, niveau aval Zv = +2,37 m IGN.

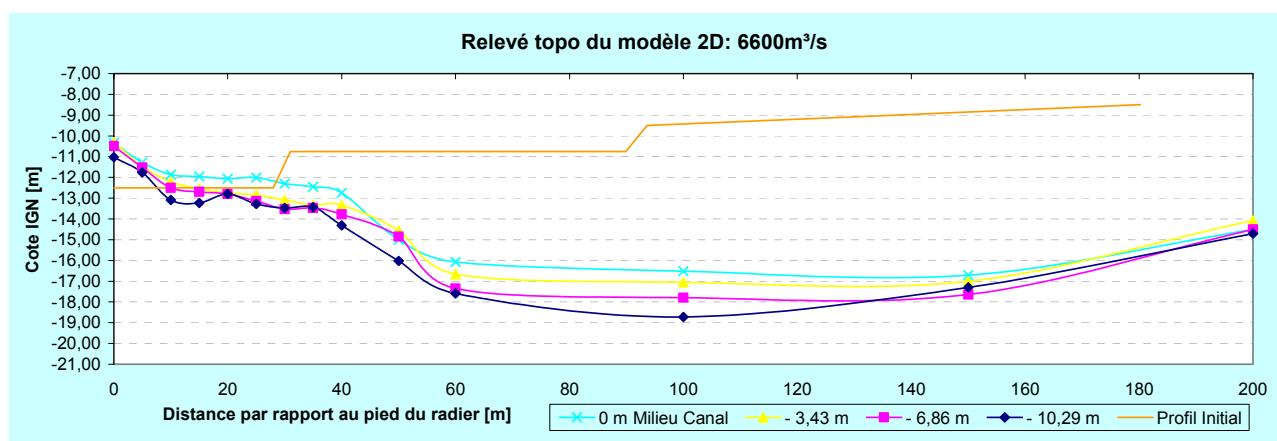


Figure 52: Relevé topographique de la cuvette d'érosion pour Q = 6600 m³/s



Figure 53: Cuvette d'érosion pour Q = 6600 m³/s pendant 1 semaine – Vue de profil rive droite



Figure 54:Zone des enrochements de protection Q= 6600 – Séiments provenant de l'amont.



Figure 55:Cuvette d'érosion après Q = 6600 m³/s pendant 1 semaine – Vue longitudinale aval

4.2.8. Comparaison des essais

Comme nous avons pu le constater lors des différents essais, la cuvette d'érosion se creuse de plus en plus au fur et à mesure que le débit augmente.

Cependant comme le montre la figure 56, même lorsque le barrage est soumis à un débit de $6600 \text{ m}^3/\text{s}$, l'érosion ne dépasse pas la cote de -19 m. L'érosion maximale, de cote -18,72 m, survient à 100 m à l'aval du pied du radier.

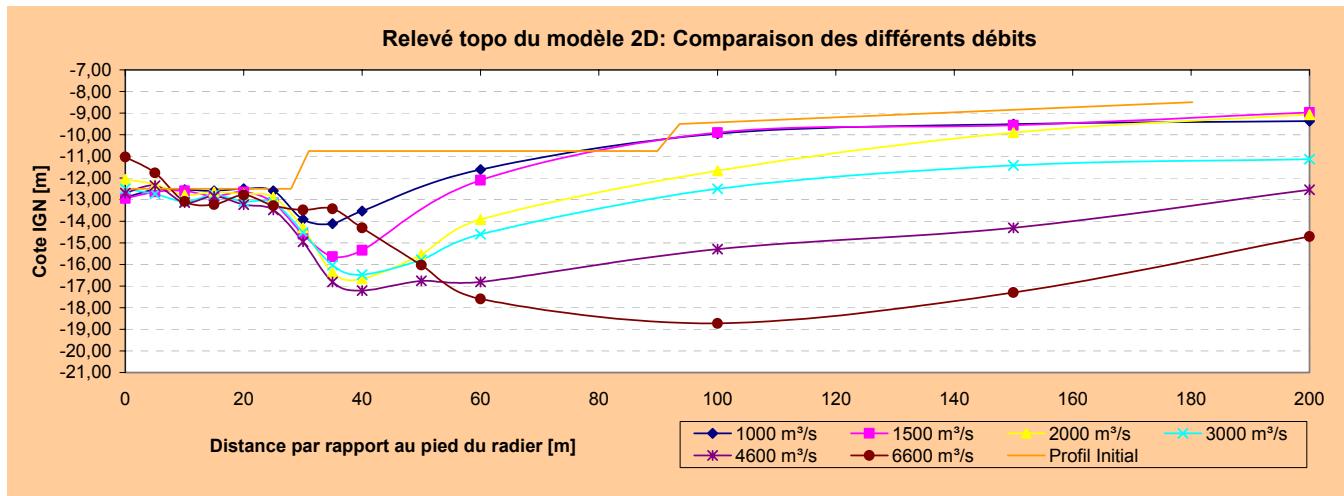


Figure 56: Relevé Topo - Evolution de la fosse d'érosion en fonction du débit

Sur les figures 57 et 58, nous pouvons remarquer que les enrochements de protection restent bien en place, et que le profil de la cuvette d'érosion garde une pente très douce quel que soit le débit testé.

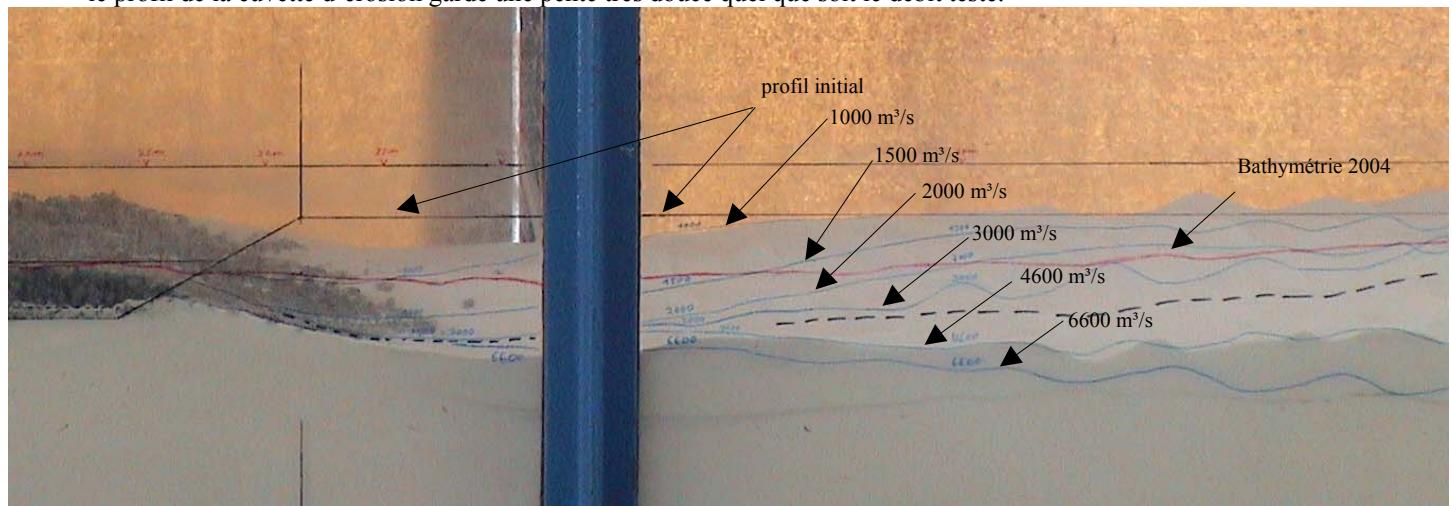


Figure 57: Comparaison des différents profils de la cuvette d'érosion selon les débits

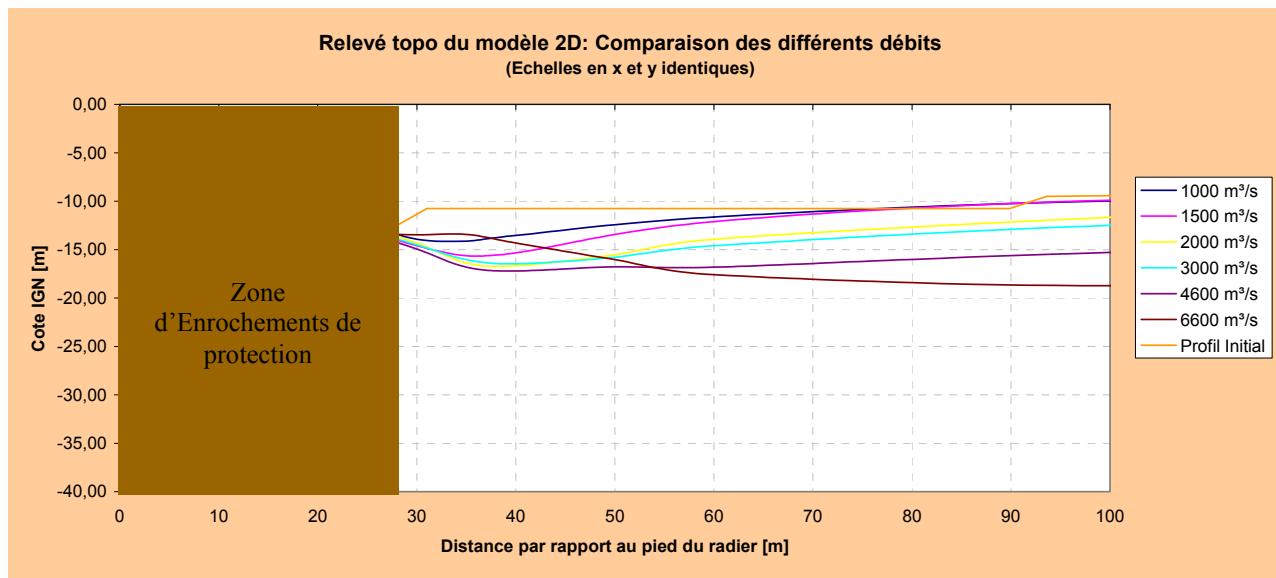


Figure 58 : Evolution de la fosse d'érosion. Echelles en x et y identiques

4.2.9. Conclusion

La forme de la cuvette d'érosion est saine et la profondeur de celle-ci reste supérieur à la cote de -19 m.
La pente de la cuvette est douce et stabilisée. La zone des enrochements de protection est stable et ne subit pas de déplacement significatif.

4.2.10. Données numériques des relevés topographiques

Q [m³/s]	[m]	[m]						RG 10,29
		RD -10,29	-6,86	-3,43	0	3,43	6,86	
1000	0	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9
	5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5
	10	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5
	15	-12,6	-12,6	-12,7	-12,7	-12,7	-12,6	-12,6
	20	-12,5	-12,6	-12,6	-12,7	-12,6	-12,6	-12,5
	25	-12,6	-12,6	-12,7	-12,7	-12,7	-12,6	-12,6
	30	-13,9	-13,4	-13,0	-12,5	-13,0	-13,4	-13,9
	35	-14,1	-13,5	-12,8	-12,2	-12,8	-13,5	-14,1
	40	-13,5	-12,8	-12,1	-11,3	-12,1	-12,8	-13,5
	60	-11,6	-11,5	-11,3	-11,1	-11,3	-11,5	-11,6
	100	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0
	150	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5
	200	-9,4	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,4
1500	0	-12,9	-12,8	-12,7	-12,6	-12,7	-12,8	-12,9
	5	-12,6	-12,4	-12,1	-11,8	-12,1	-12,4	-12,6
	10	-12,6	-12,2	-11,8	-11,4	-11,8	-12,2	-12,6
	15	-12,8	-12,5	-12,2	-11,9	-12,2	-12,5	-12,8
	20	-12,6	-12,6	-12,6	-12,6	-12,6	-12,6	-12,6
	25	-13,1	-13,1	-13,0	-12,9	-13,0	-13,1	-13,1
	30	-14,6	-14,2	-13,9	-13,5	-13,9	-14,2	-14,6
	35	-15,6	-14,9	-14,2	-13,4	-14,2	-14,9	-15,6
	40	-15,3	-14,5	-13,6	-12,7	-13,6	-14,5	-15,3
	60	-12,1	-11,5	-10,9	-10,3	-10,9	-11,5	-12,1
	100	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9
	150	-9,6	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5	-9,6
	200	-9,0	-9,1	-9,3	-9,4	-9,3	-9,1	-9,0
2000	0	-12,1	-13,0	-12,7	-12,4	-12,5	-12,7	-12,1
	5	-12,3	-12,1	-12,5	-12,7	-12,7	-12,4	-12,3
	10	-12,8	-12,6	-12,4	-12,2	-12,6	-12,5	-12,9
	15	-12,6	-12,5	-12,8	-12,4	-12,3	-12,3	-12,8
	20	-12,7	-12,6	-12,9	-12,8	-12,5	-12,5	-12,5
	25	-12,9	-13,3	-12,8	-12,7	-12,9	-13,1	-13,9
	30	-14,3	-14,8	-14,1	-14,2	-14,2	-14,6	-14,8
	35	-16,4	-15,7	-14,6	-14,3	-14,5	-15,6	-16,1
	40	-16,7	-16,1	-14,6	-13,9	-14,6	-15,7	-16,5
	50	-15,5	-15,3	-13,9	-12,4	-13,4	-14,9	-15,5
	60	-13,9	-13,9	-13,1	-11,6	-12,5	-13,9	-14,1
	100	-11,7	-11,0	-9,8	-10,0	-9,1	-10,6	-11,4
	150	-9,9	-8,9	-9,6	-9,4	-8,6	-8,9	-9,7
	200	-9,1	-8,7	-8,9	-8,8	-8,5	-8,6	-8,8

Q [m³/s]	[m]	[m]						RG 10,29
		RD -10,29	-6,86	-3,43	0	3,43	6,86	
3000	0	-12,5	-12,7	-12,6	-12,9	-13,2	-13,3	-12,8
	5	-12,7	-12,5	-12,7	-13,0	-13,1	-12,9	-13,1
	10	-13,1	-13,2	-13,1	-13,1	-13,1	-12,9	-13,2
	15	-12,8	-12,6	-12,8	-13,4	-12,7	-13,0	-13,1
	20	-13,1	-13,0	-13,2	-13,2	-13,2	-13,1	-13,0
	25	-13,1	-14,0	-14,6	-14,6	-14,3	-13,7	-13,5
	30	-14,5	-14,9	-15,1	-15,5	-14,8	-14,9	-14,6
	35	-16,0	-16,3	-15,8	-15,4	-15,8	-15,7	-16,0
	40	-16,5	-16,3	-15,7	-15,3	-15,5	-15,9	-16,0
	50	-15,8	-15,9	-15,1	-14,5	-14,8	-15,4	-15,5
	60	-14,6	-14,4	-13,6	-13,3	-13,6	-14,2	-14,6
	100	-12,5	-12,7	-12,1	-11,7	-11,9	-12,9	-13,2
	150	-11,4	-10,9	-11,6	-11,6	-11,9	-12,0	-11,7
	200	-11,1	-11,0	-10,7	-10,8	-11,2	-11,2	-11,2
4600	0	-12,7	-12,6	-12,8	-13,0	-12,8	-11,7	-10,9
	5	-12,4	-12,5	-12,7	-12,6	-12,5	-12,7	-13,0
	10	-13,1	-13,3	-13,5	-13,2	-13,1	-13,1	-13,2
	15	-12,8	-13,1	-12,9	-12,8	-12,9	-13,1	-13,2
	20	-13,2	-13,2	-13,8	-13,3	-13,7	-13,3	-12,7
	25	-13,5	-13,8	-14,2	-14,4	-14,3	-14,2	-13,6
	30	-14,9	-14,9	-15,1	-15,2	-14,8	-14,9	-14,6
	35	-16,8	-16,3	-15,9	-15,3	-15,5	-15,6	-15,7
	40	-17,2	-17,1	-16,4	-15,6	-15,4	-15,6	-15,6
	50	-16,8	-16,6	-16,5	-16,1	-15,5	-15,4	-15,4
	60	-16,8	-17,0	-16,3	-15,2	-15,1	-14,6	-14,5
	100	-15,3	-15,7	-15,4	-15,1	-14,3	-13,8	-13,2
	150	-14,3	-14,1	-14,8	-14,1	-13,1	-12,5	-12,7
	200	-12,5	-12,2	-12,2	-12,7	-12,3	-12,1	-12,2
6600	0	-11,0	-10,5	-10,3	-10,3	-10,3	-10,4	-11,1
	5	-11,8	-11,5	-11,5	-11,3	-11,0	-11,4	-11,8
	10	-13,1	-12,5	-12,2	-11,9	-11,5	-12,2	-12,3
	15	-13,2	-12,7	-12,5	-12,0	-11,6	-12,3	-12,7
	20	-12,8	-12,8	-12,7	-12,1	-11,8	-12,3	-12,6
	25	-13,3	-13,1	-12,8	-12,0	-11,7	-12,5	-12,7
	30	-13,5	-13,5	-13,1	-12,3	-12,0	-12,5	-12,9
	35	-13,4	-13,5	-13,3	-12,5	-12,0	-12,3	-14,2
	40	-14,3	-13,8	-13,3	-12,7	-12,4	-13,7	-15,2
	50	-16,0	-14,9	-14,6	-15,0	-15,4	-16,1	-15,7
	60	-17,6	-17,4	-16,7	-16,1	-15,5	-15,5	-15,4
	100	-18,7	-17,8	-17,1	-16,5	-16,8	-16,6	-16,2
	150	-17,3	-17,6	-17,0	-16,7	-17,1	-16,5	-15,6
	200	-14,7	-14,5	-14,1	-14,5	-14,2	-14,1	-14,0

COMPTE RENDU N°3

***Essais d'Erosion sur Modèle Réduit 3D
Détermination des Champs de vitesses***

1. Introduction

Lors des essais réalisés sur le modèle 2D en canal vitré, le laboratoire a validé le choix d'un matériau et d'une granulométrie de ce dernier qui garantissait la création d'une fosse d'érosion similaire à celle actuellement observée à Diamra.

L'hydroxyde d'aluminium « Al(OH)₃ » répondait à ces critères.

Afin de compléter l'étude sur le modèle 3D, le laboratoire a dû trouver un matériau qui procurerait un même coefficient d'érosion dans le modèle 3D à l'échelle 1/105 que celui de l'hydroxyde d'aluminium dans le modèle 2D à l'échelle 1/49.

En fonction des lois de similitude pour les phénomènes d'érosion, la sciure de bois calibrée « S12 » a été retenue comme fond affouillable pour le modèle 3D.

Elle est composée de particules de bois de résineux et possède les caractéristiques suivantes :

- Densité humide : $\rho = 1,1 \text{ t/m}^3$
- Granulométrie : 0,5 à 1,18 mm

2. But de l'étude

Le but du modèle tridimensionnel est d'une part de compléter l'étude des renforcements réalisée sur le modèle 2D et de vérifier d'autre part les champs de vitesses notamment à l'approche de l'entonnoir amont de l'écluse (vérification des conditions de navigation).

3. Réalisation du modèle

Le modèle réduit à réaliser est un modèle tridimensionnel de l'ensemble du barrage et des ouvrages annexes (évacuateur, écluse, garages, digue de bouchure).

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- L'échelle choisie est de 1/105.
- Le fond du modèle se situe à la cote -27 m IGN.
- La largeur totale est de 800 m et correspond à l'écluse, l'évacuateur et la digue de bouchure.
- La longueur est de 1935 m (900 m à l'amont, 35 m pour l'évacuateur et 1000 m à l'aval).
- La cote supérieure des ouvrages annexes est de +4 m IGN.
- Le débit maximal est de 6600 m³/s.

Le fond du modèle est réalisé avec de la sciure « S12 » dans la zone affouillable. En accord avec le Bureau d'Etudes, la zone affouillable étudiée s'étend de 400 m en amont à 400 m en aval du barrage.

L'ancien lit du fleuve et les abords des ouvrages annexes considérés comme fonds fixes sont simulés par des concassés calcaires et du sable de mer.

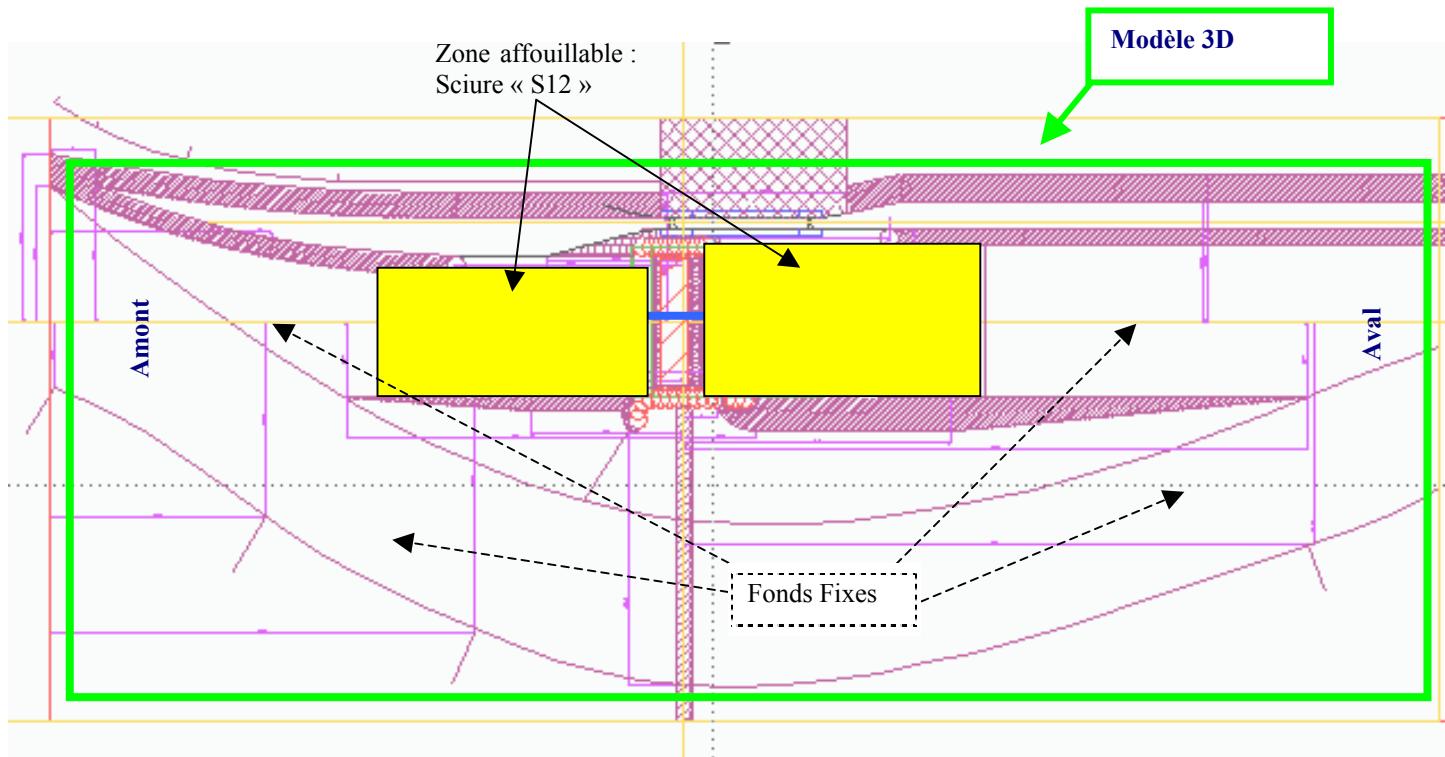


Figure 59 : Implantation du modèle 3D sur le plan général du barrage de Diamé

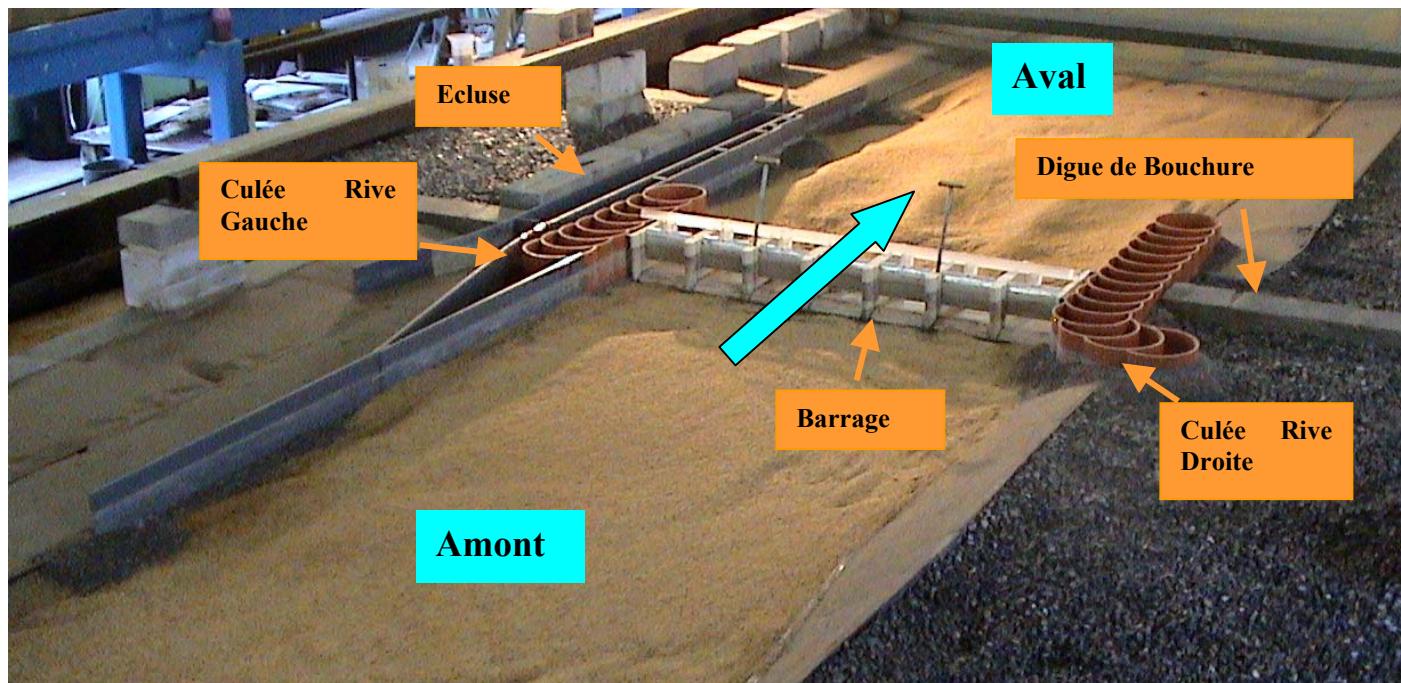


Figure 60 : Vue d'ensemble – Modèle 3D échelle 1/105

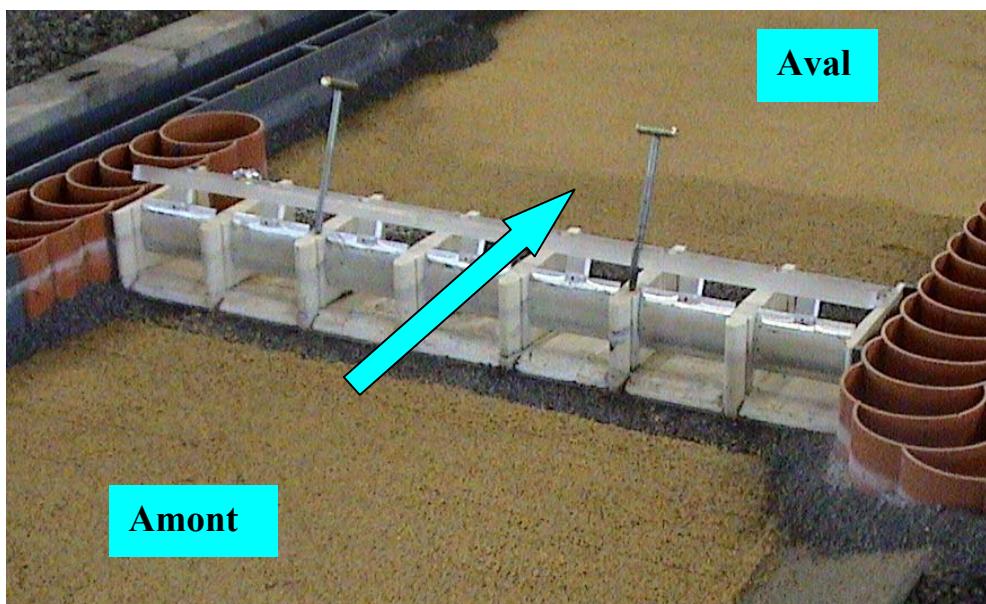


Figure 61 : Vue de l'évacuateur – Modèle 3D échelle 1/105

4. Programme des essais

En accord avec le Bureau d'Etudes, le programme des essais a été défini comme suit :

- Plage de débit, variant de 500 à 6600 m³/s : 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4600 et 6600 m³/s.

Les essais sont réalisés en respectant l'ordre des débits croissants afin de suivre au fur et à mesure l'évolution de la cuvette d'érosion lorsque celle-ci est soumise à des conditions de plus en plus contraignantes.

- Hauteur d'eau amont = +1,5 m IGN

Pour chacun des débits, et tant que la valeur de ceux-ci le permet, le niveau amont est maintenu à la cote +1,5 m IGN par un réglage adéquat de l'ouverture des vannes. Pour les débits de 4600 et de 6600 m³/s l'ouverture des vannes est totale et le niveau amont s'établit en fonction du débit et de la hauteur aval.

- Le niveau aval est fonction du débit et déterminé par la courbe de tarage d'équation suivante, fournie par le Bureau d'Etudes:

$$H_v = -1,5 + (Q / 440)^{0,5}$$
, ce qui nous donne :

Débit (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	3000	4600	6600
Niveau Aval (m IGN)	-0,43	+0,02	+0,36	+0,65	+1,11	+1,73	+2,37

5. Essais et résultats

5.1. Cuvette d'érosion du modèle 3D

La séquence de figures ci-dessous montre l'évolution de la cuvette d'érosion après chacun des essais.

Ils ont tous été conduits pendant une période de 12 heures laboratoire, ce qui compte tenu de l'échelle des temps ($1/\sqrt{105}$) imposée par les lois de similitude, correspond à une durée réelle de 123 heures soit 5,1 jours de crue.

❖ Configuration Initiale

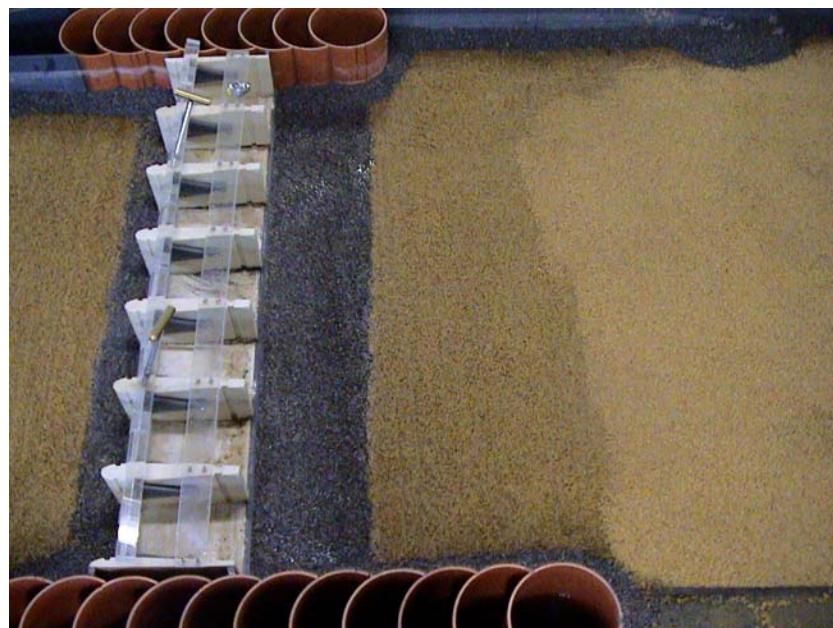


Figure 62 : Configuration initiale – Vue latérale rive droite



Figure 63 : Configuration initiale – Vue longitudinale aval

❖ 1000 m³/s

Aux figures 64 et 65 ci-dessous, on constate la création de 6 cuvettes d'érosion séparées latéralement par des amoncellements de sédiments. Tout comme dans le modèle 2D, une accumulation de sédiments apparaît dans le prolongement des passes alors qu'une érosion plus importante (cote_{min} = -15,9 m IGN) survient dans le prolongement des piles.



Figure 64 : Q = 1000 m³/s – Vue latérale rive gauche



Figure 65 : Q = 1000 m³/s – Vue longitudinale aval

❖ 1500 m³/s

Aux figures 66 et 67, on constate que le profil d'érosion a évolué vers la création de 3 cuvettes séparées l'une de l'autre par un dépôt de sédiments. Celles-ci sont plus profondes (cote_{min} = -18,4 m IGN) et plus larges que lors de l'essai précédent. Elles s'étendent jusqu'à 120-150 m en aval.



Figure 66 : Q = 1500 m³/s – Vue latérale rive droite



Figure 67 : Q = 1500 m³/s – Vue longitudinale aval

❖ 2000 m³/s

Les figures 68 et 69 montrent un profil relativement semblable à celui de l'essai précédent. Les dépôts de sédiments sont moins importants, ce qui fait moins ressortir des cuvettes pourtant plus profondes (cote_{min} = -19,2 m IGN) et plus étendues vers l'aval (jusqu'à 200 m).



Figure 68 : Q = 2000 m³/s – Vue latérale rive droite



Figure 69 : Q = 2000 m³/s – Vue longitudinale aval

❖ 3000 m³/s

Au-delà de 3000 m³/s, le profil d'érosion s'uniformise en une seule cuvette et il s'étend de plus en plus loin vers l'aval.



Figure 70 : Q = 3000 m³/s – Vue latérale rive gauche



Figure 71 : Q = 3000 m³/s – Vue longitudinale aval

❖ 4600 m³/s

Aux figures 72 et 73, on observe que l'érosion a lissé le fond de la rivière de façon plus homogène et que la cuvette se prolonge loin en aval (jusqu'à 300-350 m).

Des sédiments se déposent dans le prolongement de la culée rive gauche et commencent à former un talus parallèlement aux batardeaux de l'écluse.

Des sédiments provenant de l'amont passent au-delà du barrage et remblaient quelque peu la cuvette d'érosion juste au pied des enrochements de protection.



Figure 72 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite



Figure 73 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval

❖ 6600 m³/s

Sur les figures 74 et 75, on constate que les phénomènes observés lors de l'essai précédent se poursuivent. La cuvette s'étend à présent au-delà des 400 m et le talus parallèle à l'écluse atteint la cote -3,3 m IGN.



Figure 74 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue latérale rive droite



Figure 75 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vue longitudinale aval

❖ Complément à propos de l'érosion en aval de la culée rive droite

Lors de l'essai à $6600 \text{ m}^3/\text{s}$, une érosion importante en aval de la culée rive droite est apparue. Elle a fait apparaître une des planches utilisées pour le coffrage de la zone supposée non affouillable, en aval de la culée.

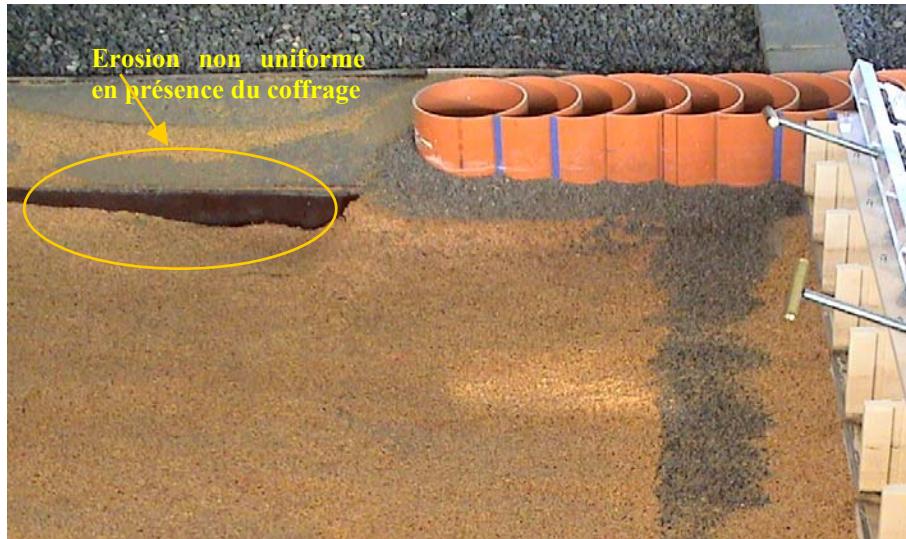


Figure 76 : Erosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ avec coffrage

Afin de vérifier que cette érosion était due exclusivement à la présence d'un coffrage non représentatif de la réalité, on a reconduit l'essai en supprimant cet élément et en remplaçant le fond fixe de cette zone par un fond affouillable de sciure « S12 ».

On a rapidement pu observer une érosion moindre et plus continue ainsi qu'une accumulation de sédiments dans le prolongement aval de la culée.

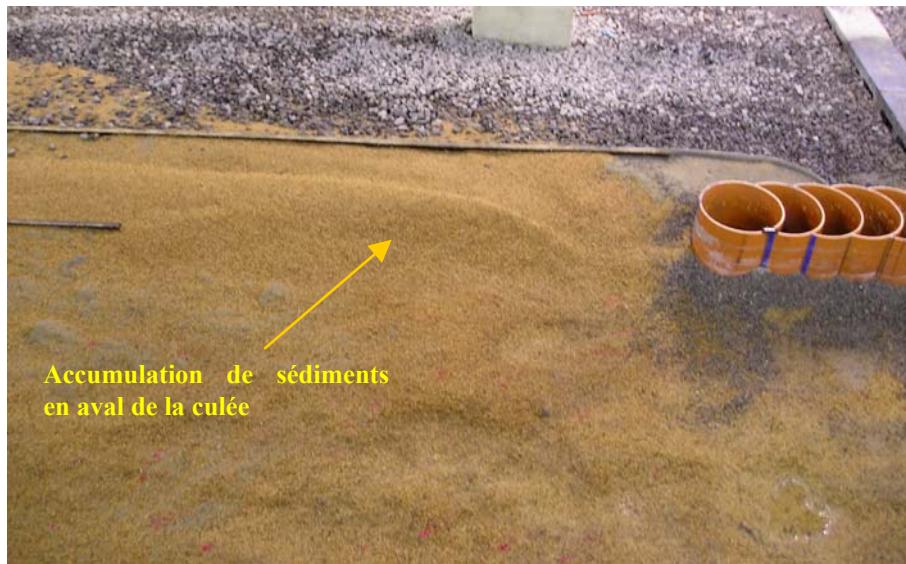


Figure 77 : Erosion pour $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ sans coffrage

5.2. Relevés topographiques du modèle 3D

Pour compléter la série de photos précédentes, un relevé topographique de la cuvette d'érosion a été réalisé après chacun des essais.

La figure 78 montre un maillage simplifié du quadrillage de la fosse d'érosion.

Les points de mesure ont été relevés à une distance de 0 ; 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 80 ; 100 ; 125 ; 150 ; 175 ; 200 ; 225 et 250 mètres du pied aval du barrage dans le sens de l'écoulement, ainsi que tous les 12,25 mètres transversalement à l'écoulement.

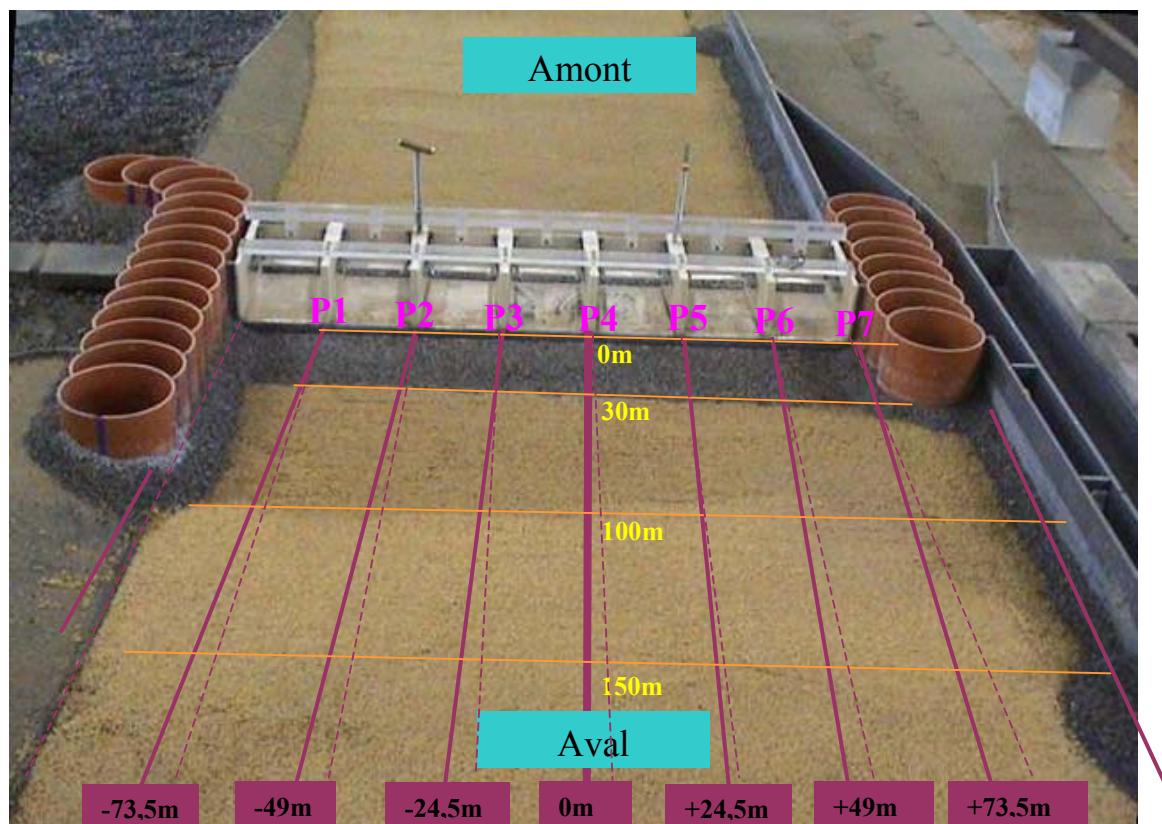


Figure 78 : Quadrillage de la fosse d'érosion pour les relevés topographiques

La prise de mesure s'effectue point par point au moyen d'un laser (figure 79). Il est positionné sur une poutrelle métallique étalonnée munie de repères de référence. La poutrelle est déplacée dans le sens de l'écoulement sur un cadre gradué pour couvrir l'ensemble du quadrillage.



Figure 79 : Mesure de la fosse d'érosion au distance mètre laser

En vue d'obtenir une meilleure visualisation du relief, les figures 80 à 85 ont été réalisées avec une distorsion verticale d'un facteur 2. L'ensemble des données numériques des relevés topographiques est repris ci-après.

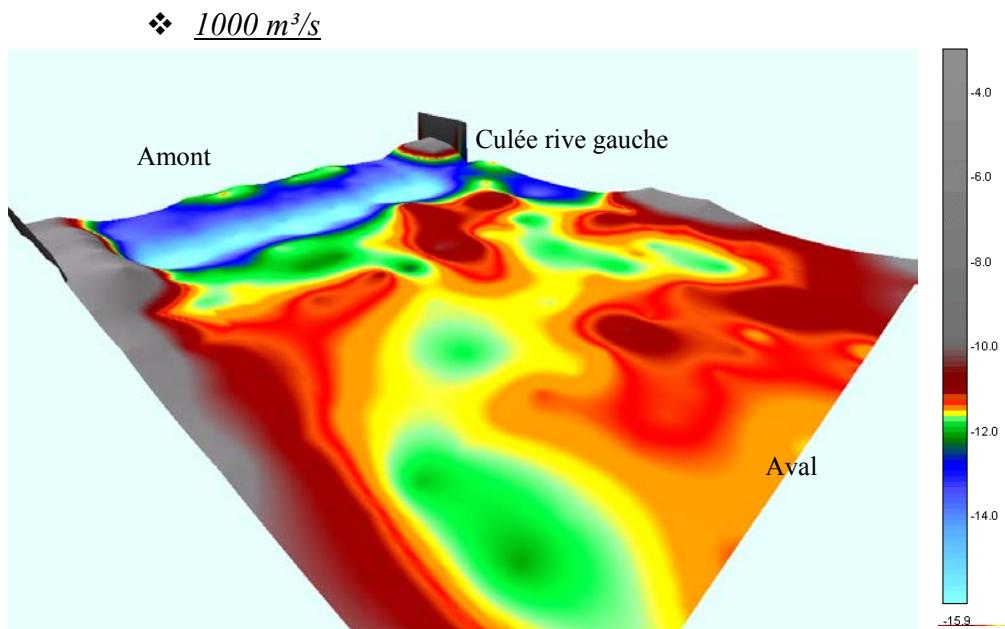


Figure 80 : Relevé topographique – Q = 1000 m³/s

❖ 1500 m³/s

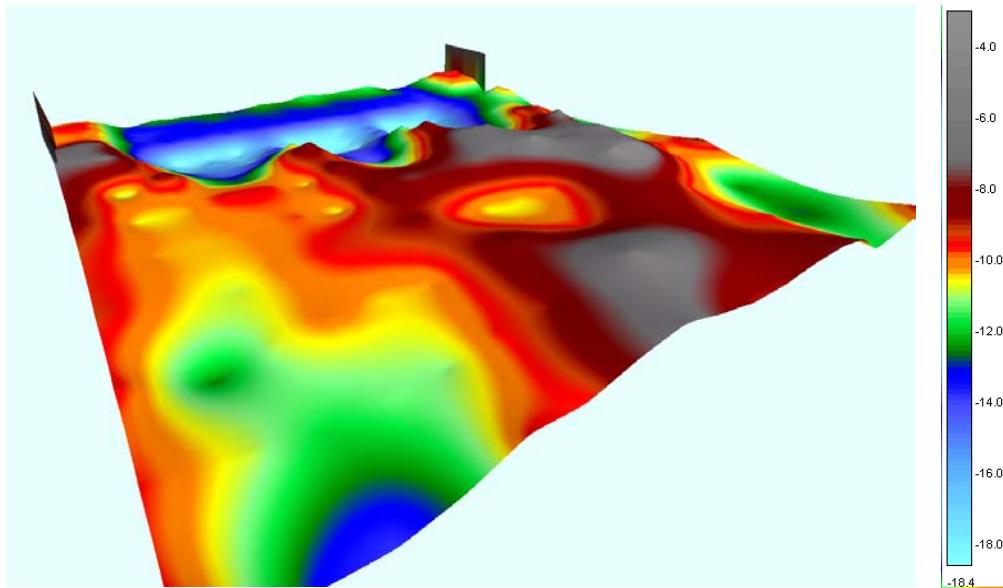


Figure 81 : Relevé topographique – Q = 1500 m³/s

❖ 2000 m³/s

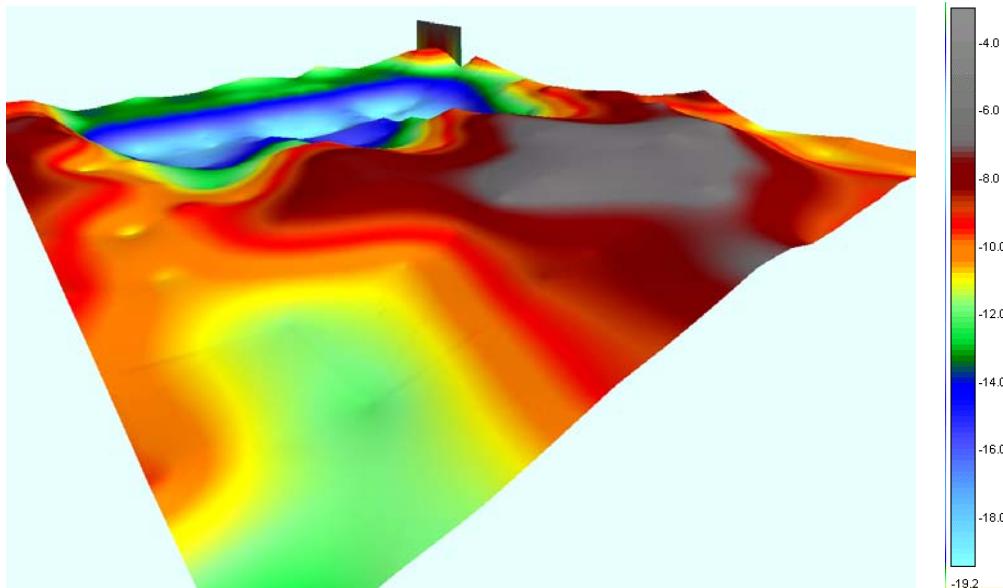


Figure 82 : Relevé topographique – Q = 2000 m³/s

❖ 3000 m³/s

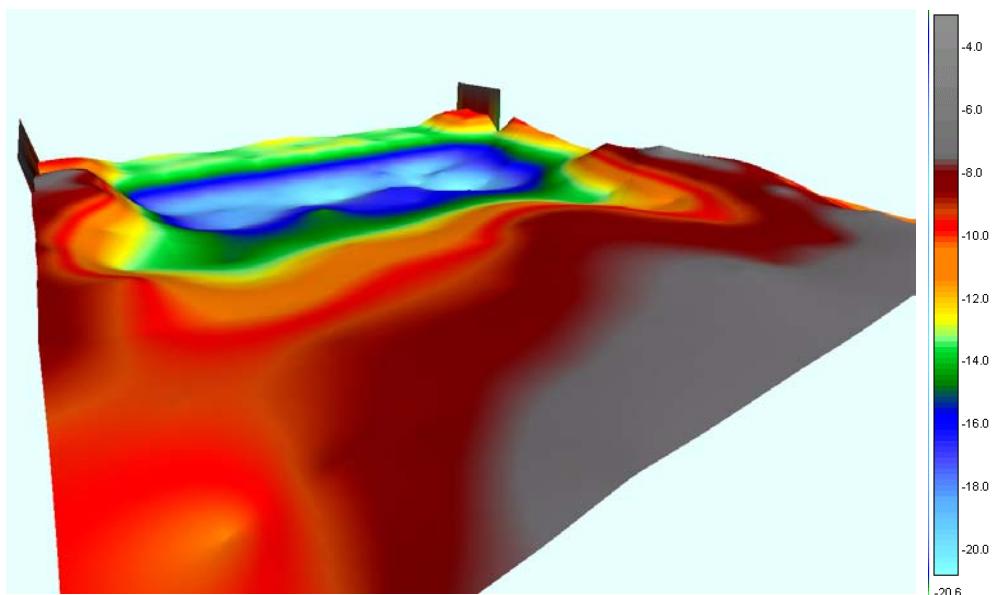


Figure 83 : Relevé topographique – Q = 3000 m³/s

❖ 4600 m³/s

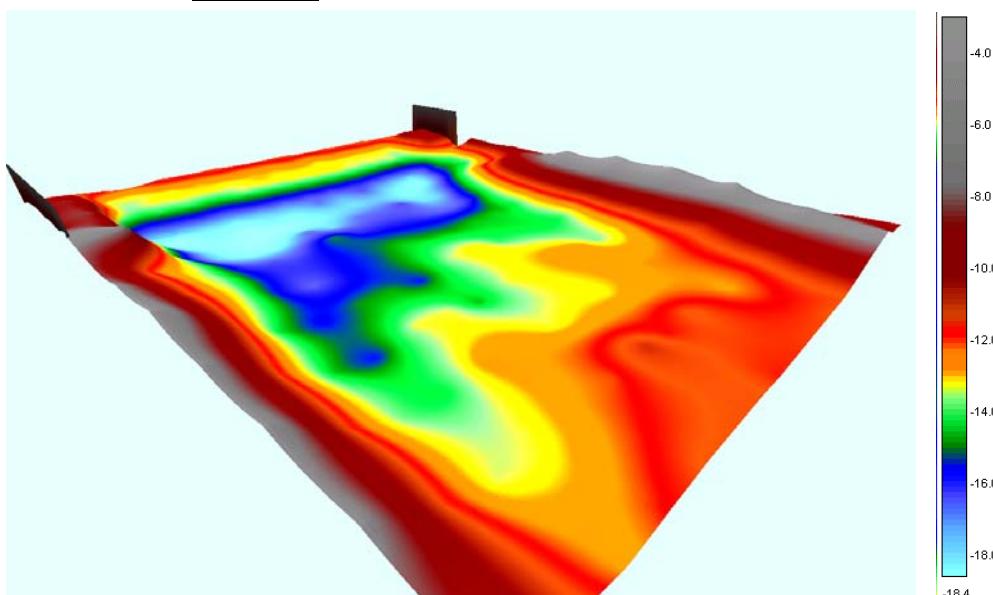


Figure 84 : Relevé topographique – Q = 4600 m³/s

❖ 6600 m³/s

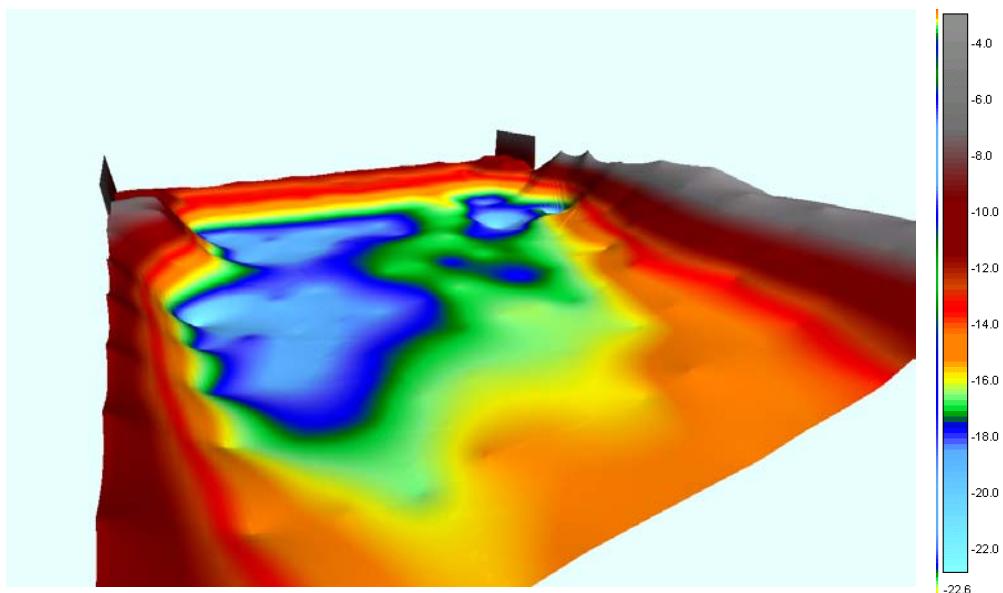


Figure 85 : Relevé topographique – Q = 6600 m³/s

❖ Données numériques des relevés topographiques

Q [m³/s]	[m]	Culée			[m]							Culée						
		RD -100,7	P1 -85,75	P2 -73,5	P3 -61,25	P4 -49	P5 -36,75	P6 -24,5	P7 -12,25	RG 0	12,25	24,5	36,75	49	61,25	73,5	85,75	100,7
0	0	4,0	-10,2	-12,7	-13,0	-13,2	-13,3	-13,4	-12,8	-13,2	-12,9	-13,5	-13,3	-12,7	-13,2	-12,6	-11,8	4,0
	10	4,0	-10,0	-13,5	-13,0	-13,3	-13,6	-13,5	-12,8	-13,4	-13,2	-13,4	-13,4	-13,5	-13,5	-13,4	-9,4	4,0
	20	4,0	-8,7	-13,7	-13,4	-13,3	-13,2	-13,3	-12,6	-12,9	-12,8	-13,0	-13,3	-13,5	-12,9	-13,3	-10,6	4,0
	30	4,0	-9,0	-13,0	-13,3	-13,2	-13,5	-13,0	-12,8	-13,2	-12,9	-12,6	-13,3	-13,5	-13,6	-13,5	-9,8	4,0
	40	4,0	-9,9	-12,7	-13,4	-13,3	-13,2	-13,2	-13,3	-13,5	-13,2	-13,6	-13,6	-13,5	-13,9	-13,0	-13,3	4,0
	50	4,0	-9,2	-12,9	-13,6	-13,5	-12,9	-12,9	-12,9	-12,7	-13,0	-12,5	-12,4	-12,4	-12,8	-12,3	-12,0	
	60	4,0	-7,7	-12,8	-12,8	-12,0	-13,5	-13,2	-12,7	-13,0	-13,0	-12,7	-12,2	-12,3	-12,8	-12,7	-11,8	
	80	4,0	-7,4	-12,3	-13,0	-12,8	-12,8	-12,9	-12,7	-12,7	-12,7	-12,8	-12,7	-12,5	-12,8	-13,2	-12,7	-12,4
	100	-7,7	-11,2	-11,5	-12,3	-12,2	-12,4	-12,0	-11,9	-12,4	-12,3	-12,2	-12,4	-12,4	-13,3	-13,3	-13,4	-12,8
	125	-8,4	-10,9	-11,6	-11,7	-12,0	-11,8	-11,2	-11,7	-12,0	-12,3	-12,7	-12,3	-12,0	-12,1	-12,5	-12,5	-12,1
	150	-8,8	-10,9	-11,4	-11,5	-11,6	-11,8	-12,0	-11,7	-11,7	-11,7	-11,9	-12,2	-11,9	-11,5	-11,2	-11,5	-9,3
	175	-9,3	-10,8	-11,6	-11,8	-11,5	-12,0	-11,9	-11,7	-11,8	-11,8	-11,7	-11,6	-11,7	-11,9	-11,6	-11,2	-7,7
	200	-10,1	-10,8	-12,0	-11,6	-11,6	-11,6	-11,6	-11,7	-11,7	-11,7	-11,5	-11,2	-11,9	-11,9	-11,3	-11,2	-10,7
	225	-9,9	-11,1	-12,0	-12,0	-11,6	-11,6	-11,4	-11,4	-11,2	-11,2	-10,9	-10,7	-10,8	-11,2	-10,9	-11,1	-10,7
	250	-9,1	-11,4	-11,9	-11,4	-11,6	-11,6	-11,6	-11,8	-11,5	-11,4	-11,2	-10,8	-10,6	-10,4	-10,3	-9,3	
1000	0	4,0	-9,9	-12,3	-13,2	-13,0	-11,8	-12,3	-11,7	-12,6	-12,5	-12,3	-11,9	-12,8	-13,3	-13,4	-11,1	4,0
	10	4,0	-10,2	-13,4	-13,3	-13,2	-12,7	-11,3	-11,9	-12,7	-11,6	-11,7	-11,5	-13,2	-12,8	-13,6	-9,1	4,0
	20	4,0	-9,2	-13,4	-13,4	-13,0	-13,2	-13,2	-12,8	-13,2	-13,2	-12,7	-13,5	-13,6	-13,5	-9,2	4,0	
	30	4,0	-8,3	-13,2	-13,7	-13,3	-13,7	-13,4	-13,2	-13,2	-13,0	-12,8	-13,5	-13,7	-13,7	-13,9	-10,0	4,0
	40	4,0	-8,2	-14,4	-15,8	-14,4	-15,5	-14,3	-15,7	-14,5	-15,6	-13,9	-15,7	-15,0	-15,9	-13,7	-13,3	4,0
	50	4,0	-8,4	-14,5	-15,7	-14,8	-14,9	-14,9	-15,7	-15,0	-15,6	-14,4	-15,7	-15,5	-15,9	-13,4	-12,6	-11,8
	60	4,0	-7,5	-13,0	-14,3	-14,0	-14,0	-13,8	-14,9	-14,2	-14,6	-13,3	-14,3	-14,8	-14,5	-12,5	-12,7	-11,4
	80	4,0	-7,0	-11,7	-12,0	-12,5	-11,6	-11,9	-12,3	-12,3	-12,0	-10,7	-12,1	-12,2	-12,0	-11,4	-12,5	-12,5
	100	-7,7	-11,2	-11,7	-11,5	-11,8	-12,2	-12,2	-11,5	-11,5	-11,1	-10,8	-11,2	-10,6	-10,5	-12,7	-13,5	-12,7
	125	-7,8	-10,9	-11,2	-11,3	-11,1	-11,2	-10,9	-12,4	-10,4	-10,6	-11,6	-11,3	-12,0	-11,5	-11,7	-12,3	-12,1
	150	-9,6	-10,7	-11,1	-11,3	-11,4	-11,5	-11,6	-11,4	-11,2	-11,4	-11,7	-11,8	-11,3	-11,1	-10,7	-11,5	-8,2
	175	-9,4	-10,9	-11,4	-11,5	-11,6	-11,8	-11,6	-11,5	-11,6	-11,5	-11,4	-11,9	-11,4	-11,7	-11,3	-11,1	-7,9
	200	-10,2	-11,1	-12,0	-11,6	-11,4	-11,3	-11,5	-11,4	-10,5	-11,3	-11,2	-11,1	-11,5	-11,8	-11,2	-11,2	-10,5
	225	-10,1	-11,4	-12,1	-11,7	-11,5	-11,3	-11,2	-11,2	-11,3	-11,1	-11,4	-10,7	-10,6	-11,1	-10,9	-10,8	-10,7
	250	-10,3	-11,3	-11,6	-11,4	-11,3	-11,4	-11,5	-11,4	-11,4	-11,3	-11,1	-11,5	-10,8	-10,4	-10,4	-9,1	
1500	0	4,0	-10,4	-12,8	-12,1	-12,4	-12,5	-12,8	-12,1	-12,3	-11,4	-11,9	-11,8	-11,4	-13,2	-12,8	-11,3	4,0
	10	4,0	-9,7	-13,5	-13,4	-13,3	-12,5	-12,8	-12,6	-12,8	-12,2	-12,8	-12,4	-12,1	-12,5	-13,4	-9,3	4,0
	20	4,0	-9,8	-13,6	-13,3	-13,0	-13,3	-13,3	-12,9	-13,2	-13,0	-13,3	-13,5	-13,2	-13,6	-13,6	-9,9	4,0
	30	4,0	-10,2	-13,2	-13,3	-13,5	-13,6	-13,4	-13,3	-13,0	-12,9	-12,9	-13,3	-13,4	-13,6	-13,7	-10,1	4,0
	40	4,0	-9,6	-14,5	-17,4	-16,8	-17,2	-14,9	-16,8	-16,4	-16,5	-14,5	-16,8	-16,0	-16,1	-13,6	-12,6	4,0
	50	4,0	-8,5	-14,5	-17,0	-16,3	-16,9	-15,3	-18,2	-18,0	-17,5	-14,8	-18,4	-18,2	-16,7	-13,6	-12,6	-10,2
	60	4,0	-7,5	-13,0	-15,9	-15,8	-16,2	-13,9	-17,2	-18,0	-17,6	-14,3	-18,1	-16,5	-16,0	-13,6	-12,2	-10,2
	80	4,0	-7,1	-10,2	-13,5	-14,5	-13,3	-10,5	-14,0	-14,3	-13,9	-11,1	-15,5	-16,9	-14,5	-11,5	-10,6	-12,4
	100	-7,7	-11,1	-8,1	-11,6	-12,6	-9,7	-7,7	-12,4	-14,5	-12,0	-7,7	-11,6	-14,2	-12,7	-8,6	-9,2	-12,6
	125	-8,3	-10,5	-10,3	-9,4	-9,5	-10,4	-8,0	-9,9	-11,1	-8,7	-6,7	-6,5	-9,6	-9,0	-6,4	-11,7	-11,8
	150	-9,3	-10,2	-10,3	-10,1	-9,7	-10,5	-8,4	-7,6	-7,8	-7,2	-7,1	-5,6	-6,9	-6,2	-6,7	-10,8	-10,4
	175	-9,2	-10,3	-10,7	-10,0	-9,4	-9,1	-8,5	-9,7	-10,5	-10,4	-9,8	-8,0	-5,5	-5,6	-7,9	-10,2	-8,7
	200	-9,4	-12,4	-10,7	-9,9	-10,4	-10,2	-9,0	-7,9	-9,0	-9,6	-8,6	-8,0	-8,3	-9,8	-10,7	-12,4	-10,7
	225	-9,6	-10,7	-11,8	-11,2	-11,1	-9,6	-8,8	-7,1	-5,9	-6,6	-7,5	-8,6	-9,4	-9,7	-12,2	-12,6	-11,5
	250	-9,1	-13,3	-13,8	-12,2	-9,4	-9,7	-7,7	-6,4	-7,9	-9,0	-8,8	-8,0	-7,7	-8,5	-11,9	-10,9	-9,0
2000	0	4,0	-10,4	-13,4	-13,3	-12,4	-13,3	-13,4	-12,4	-11,5	-12,2	-13,3	-11,2	-12,2	-13,0	-12,3	-11,3	4,0
	10	4,0	-9,5	-13,4	-13,3	-13,2	-13,5	-13,4	-13,0	-12,7	-12,8	-13,0	-12,7	-13,0	-13,3	-13,0	-9,7	4,0
	20	4,0	-9,9	-13,0	-13,2	-13,2	-13,2	-12,7	-12,7	-12,9	-12,9	-12,9	-13,6	-13,4	-13,3	-13,5	-9,0	4,0
	30	4,0	-9,8	-13,2	-13,6	-13,6	-13,4	-13,4	-13,0	-13,0	-12,7	-12,8	-13,4	-13,5	-13,6	-13,6	-10,1	4,0
	40	4,0	-9,0	-15,9	-18,1	-17,2	-17,5	-15,9	-17,2	-17,0	-16,5	-15,7	-17,1	-16,7	-16,2	-14,7	-12,6	4,0
	50	4,0	-8,6	-15,8	-18,1	-17,8	-18,4	-16,9	-18,5	-18,4	-18,1	-16,5	-18,6	-18,7	-17,7	-14,5	-13,9	-9,1
	60	4,0	-7,6	-14,3	-17,1	-17,6	-17,5	-16,4	-19,1	-19,0	-18,8	-16,7	-19,0	-17,7	-17,0	-14,9	-13,8	-9,6
	80	4,0	-7,7	-12,1	-16,2	-16,8	-15,8	-14,1	-15,8	-15,8	-15,5	-14,9	-18,3	-19,2	-17,9	-14,0	-12,5	-11,2
	100	-7,4	-10,8	-10,5	-12,9	-14,6	-13,3	-12,3	-14,9	-15,7	-14,9	-12,7	-15,4	-16,1	-14,4	-11,4	-9,8	-12,3
	125	-8,0	-9,0	-10,3	-12,6	-11,6	-9,6	-9,7	-12,5	-13,2	-10,9	-8,6	-11,7	-13,7	-12,8	-8,4	-9,9	-12,2
	150	-8,7	-10,8	-9,2	-10,2	-9,0	-7,5	-7,8	-9,7	-9,8	-7,8	-7,2	-8,5	-10,2	-9,7	-7,5	-8,1	-10,2
	175	-9,1	-10,6	-9,7	-8,3	-7,6	-7,5	-7,5	-7,5	-6,3	-6,4	-7,3	-8,1	-7,8	-6,9	-11,3	-7,0	
	200	-10,0	-11,1	-11,6	-10,8	-10,5	-9,2	-6,6	-6,1	-6,1	-6,1	-6,4	-5,9	-6,5	-6,5	-8,2	-10,1	-11,3
	225	-9,6	-11,4	-12,0	-11,1	-9,8	-8,4	-8,3	-7,7	-7,1	-6,3	-7,0	-7,1	-7,7	-8,7	-10,3	-10,8	-9,8
	250	-14,2	-11,8	-11,6	-10,4	-9,1	-8,6	-7,8	-6,7	-7,2	-8,7	-9,1	-9,0	-9,2	-8,7	-9,4	-10,7	-9,6

Note : Colonne 1 : débit en m³/s

Colonne 2 : distance au pied aval du barrage dans la direction longitudinale (m)

Colonne 3 et suivantes : distance au centre de l'évacuateur dans la direction transversale (m) sens + vers la RG et - vers la rive droite

Q [m ³ /s]	[m]	Culée	[m]												Culée	RG			
		RD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	RG	RD	RD	RD	RD	RD	RG			
		-100,7	-85,75	-73,5	-61,25	-49	-36,75	-24,5	-12,25	0	12,25	24,5	36,75	49	61,25	73,5	85,75	100,7	
3000	0	4,0	-11,4	-13,3	-12,6	-12,9	-13,6	-13,3	-12,5	-12,3	-12,8	-13,5	-13,4	-13,0	-13,4	-11,1	4,0		
	10	4,0	-10,3	-13,6	-13,3	-13,4	-13,4	-13,4	-12,9	-13,5	-13,3	-13,0	-13,5	-13,5	-13,5	-13,7	-9,4	4,0	
	20	4,0	-9,8	-13,4	-13,3	-13,0	-13,0	-13,6	-13,0	-13,0	-12,8	-13,6	-13,2	-13,3	-13,5	-10,0	4,0		
	30	4,0	-10,6	-13,5	-13,4	-13,7	-14,4	-13,3	-13,4	-12,7	-13,3	-13,0	-13,5	-13,8	-13,7	-13,9	-9,9	4,0	
	40	4,0	-9,9	-16,6	-17,6	-18,1	-17,8	-17,5	-17,8	-17,8	-17,5	-17,4	-17,9	-18,1	-17,5	-16,6	-14,0	4,0	
	50	4,0	-8,5	-16,9	-18,5	-18,7	-18,9	-18,6	-19,3	-19,0	-18,7	-17,6	-19,2	-19,5	-18,3	-16,6	-15,5	-8,8	
	60	4,0	-7,7	-15,5	-17,8	-18,1	-18,7	-19,1	-20,0	-20,1	-19,2	-18,6	-20,0	-17,9	-17,6	-16,4	-15,1	-9,8	
	80	4,0	-7,8	-14,3	-17,2	-18,3	-18,0	-16,7	-17,6	-17,2	-16,3	-17,1	-19,5	-20,6	-19,1	-15,5	-14,3	-11,1	
	100	-7,8	-11,8	-13,3	-14,7	-15,9	-15,7	-14,5	-16,1	-16,3	-16,5	-15,8	-16,4	-17,4	-17,7	-15,7	-14,2	-12,2	
	125	-8,3	-13,2	-13,9	-14,8	-14,3	-14,4	-14,3	-14,5	-14,4	-14,3	-14,2	-14,5	-14,8	-14,3	-11,3	-8,0	-11,7	
	150	-8,4	-9,3	-11,7	-12,7	-12,0	-11,5	-11,8	-11,9	-11,3	-10,7	-11,2	-12,3	-13,7	-13,0	-9,0	-6,3	-9,1	
	175	-8,2	-9,6	-10,3	-10,6	-10,2	-9,9	-9,9	-9,8	-8,6	-8,5	-9,0	-9,8	-11,4	-11,3	-8,5	-7,5	-8,0	
	200	-9,4	-9,2	-9,2	-8,7	-8,7	-8,7	-8,6	-8,0	-7,8	-7,9	-8,3	-8,6	-9,5	-8,7	-7,4	-8,1	-10,5	
	225	-9,8	-10,3	-8,6	-8,3	-7,8	-7,7	-7,5	-7,4	-7,3	-7,1	-7,8	-7,7	-8,0	-7,3	-7,1	-10,7	-10,9	
	250	-9,3	-10,0	-7,8	-7,4	-6,4	-6,7	-6,7	-6,7	-7,0	-6,9	-6,6	-6,9	-6,6	-5,9	-6,4	-10,6	-9,4	
4600	0	4,0	-11,2	-11,6	-12,0	-11,3	-11,4	-11,2	-11,5	-11,4	-11,2	-11,5	-11,2	-11,3	-10,9	-11,2	-11,2	4,0	
	10	4,0	-10,0	-13,4	-13,4	-12,9	-12,8	-12,6	-12,7	-12,7	-12,4	-12,9	-12,4	-12,7	-12,6	-12,9	-9,4	4,0	
	20	4,0	-9,3	-13,4	-13,2	-13,0	-12,9	-13,4	-12,8	-13,0	-13,0	-13,0	-13,4	-13,4	-13,4	-13,5	-10,1	4,0	
	30	4,0	-9,0	-13,9	-14,2	-14,0	-14,6	-13,5	-13,5	-13,2	-13,0	-12,9	-13,5	-13,5	-13,4	-13,9	-10,2	4,0	
	40	4,0	-9,2	-17,5	-17,9	-17,0	-17,4	-16,6	-16,4	-16,1	-16,0	-15,8	-16,0	-16,6	-17,2	-15,8	-12,6	4,0	
	50	4,0	-8,7	-16,9	-18,3	-17,7	-18,3	-17,6	-17,6	-16,4	-17,0	-16,2	-17,1	-17,7	-18,0	-15,3	-14,1	-9,4	
	60	4,0	-9,1	-15,3	-17,8	-18,1	-18,4	-18,4	-17,9	-17,4	-17,4	-17,1	-17,6	-17,8	-17,1	-15,0	-14,3	-9,5	
	80	4,0	-7,4	-14,8	-17,0	-17,9	-18,0	-16,5	-17,4	-16,5	-16,5	-16,2	-17,2	-17,1	-14,9	-12,3	-11,8	-9,4	
	100	-8,2	-12,1	-13,5	-15,7	-16,2	-16,2	-14,9	-15,9	-15,9	-16,0	-16,3	-16,4	-15,9	-12,8	-9,9	-8,3	-9,7	
	125	-7,3	-11,2	-13,3	-15,5	-16,4	-15,6	-15,6	-15,3	-14,6	-14,8	-14,9	-14,7	-14,6	-14,4	-11,5	-7,9	-5,8	-9,8
	150	-5,9	-10,6	-14,4	-15,6	-14,9	-14,8	-15,5	-15,3	-12,9	-14,0	-14,1	-14,3	-14,1	-11,3	-7,1	-4,9	-9,2	
	175	-6,7	-11,7	-14,6	-15,5	-13,3	-13,4	-14,7	-13,3	-12,9	-12,5	-12,6	-13,7	-12,7	-10,5	-7,2	-5,1	-7,6	
	200	-6,5	-11,5	-13,8	-14,3	-12,3	-12,5	-13,3	-12,9	-13,0	-12,6	-12,2	-12,1	-11,6	-10,5	-7,5	-5,6	-10,6	
	225	-7,1	-11,4	-13,4	-13,2	-12,3	-12,0	-10,6	-11,7	-11,2	-11,8	-12,3	-11,9	-10,7	-8,7	-6,7	-7,5	-10,2	
	250	-8,5	-11,1	-12,4	-11,7	-11,2	-11,2	-11,2	-11,6	-11,5	-11,4	-11,3	-11,3	-9,8	-8,1	-7,0	-8,7	-9,4	
6600	0	4,0	-11,2	-11,3	-11,8	-11,2	-11,5	-11,2	-11,5	-11,1	-11,1	-11,1	-10,9	-11,2	-10,6	-11,5	-11,3	4,0	
	10	4,0	-10,3	-13,5	-13,2	-13,0	-12,9	-12,8	-12,2	-12,9	-12,3	-12,8	-12,1	-12,4	-12,5	-13,8	-9,4	4,0	
	20	4,0	-9,5	-13,3	-13,3	-13,2	-13,0	-13,4	-13,0	-12,9	-12,9	-12,9	-13,5	-13,3	-13,5	-10,0	4,0		
	30	4,0	-9,8	-13,7	-14,1	-14,1	-14,5	-13,5	-14,3	-13,0	-13,3	-13,4	-13,6	-13,9	-13,8	-13,6	-9,9	4,0	
	40	4,0	-9,6	-17,9	-18,0	-17,2	-16,7	-16,6	-16,5	-16,1	-16,3	-16,2	-14,9	-16,6	-17,9	-17,5	-12,3	4,0	
	50	4,0	-9,0	-17,8	-18,5	-18,2	-18,1	-17,8	-17,8	-17,5	-17,4	-16,8	-15,7	-17,2	-18,3	-17,6	-14,8	-9,0	
	60	4,0	-7,5	-16,9	-18,6	-18,1	-18,6	-18,7	-18,3	-18,4	-17,5	-16,7	-15,9	-17,8	-17,5	-16,8	-13,7	-5,6	
	80	4,0	-7,8	-16,3	-19,0	-18,7	-18,8	-17,9	-17,8	-18,1	-17,1	-16,8	-17,4	-20,6	-19,1	-16,7	-22,9	-4,3	
	100	-7,7	-14,1	-16,2	-17,4	-18,1	-17,7	-17,5	-17,1	-16,9	-16,6	-17,7	-17,8	-17,9	-15,7	-15,7	-11,9	-5,7	
	125	-8,4	-20,2	-19,3	-18,1	-18,6	-17,9	-16,9	-16,9	-17,7	-16,8	-17,2	-16,6	-16,1	-14,0	-12,5	-9,1	-3,6	
	150	-9,0	-18,0	-17,8	-18,8	-18,3	-18,4	-17,9	-16,6	-17,1	-17,7	-17,1	-15,7	-15,6	-11,6	-9,6	-6,0	-3,4	
	175	-9,6	-17,5	-18,4	-18,3	-17,6	-17,2	-17,1	-16,3	-16,3	-16,3	-16,9	-15,9	-13,6	-12,7	-10,4	-7,4	-5,3	-6,5
	200	-9,5	-15,9	-17,2	-17,4	-16,5	-16,2	-16,3	-16,3	-16,1	-16,1	-14,5	-13,9	-13,0	-9,6	-7,6	-5,1	-6,2	
	225	-9,2	-14,4	-15,5	-16,5	-15,3	-15,4	-15,7	-15,7	-14,3	-14,4	-14,3	-13,7	-12,0	-9,3	-7,1	-4,5	-6,6	
	250	-9,2	-13,2	-14,9	-15,5	-14,8	-14,8	-14,8	-14,9	-14,3	-14,1	-13,7	-11,7	-10,7	-9,0	-6,4	-5,0	-7,4	

Note : Colonne 1 : débit en m³/s

Colonne 2 : distance au pied aval du barrage dans la direction longitudinale (m)

Colonne 3 et suivantes : distance au centre de l'évacuateur dans la direction transversale (m) sens + vers la RG et - vers la rive droite

5.3. Champs de vitesses

5.3.1. Champs de vitesses à l'entonnement amont

En vue d'observer les champs de vitesses à l'entonnement amont de l'écluse et de vérifier la condition de navigation à l'approche de celle-ci, on a réalisé une série de clichés en mode « pause longue » pour chacun des essais ($Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ à $6600 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces clichés, couplés à de petits films vidéo disponibles sur un support annexe, permettent de visualiser les champs de vitesses.

La prise de vue « A », délimitée par le rectangle orange, ne couvre qu'une zone très limitée de l'écoulement réel du fleuve. La direction et le sens des vecteurs de vitesse des figures 87 à 92 n'est donc valable que localement et il ne faut dès lors pas s'étonner d'observer, pour certains débits, un courant inverse se dirigeant de l'aval vers l'amont provoqué par un large tourbillon.

Sur ces figures, les flèches jaunes indiquent la direction et le sens des lignes de courant, les ronds jaunes (○) représentent des zones de vitesses quasi nulles.

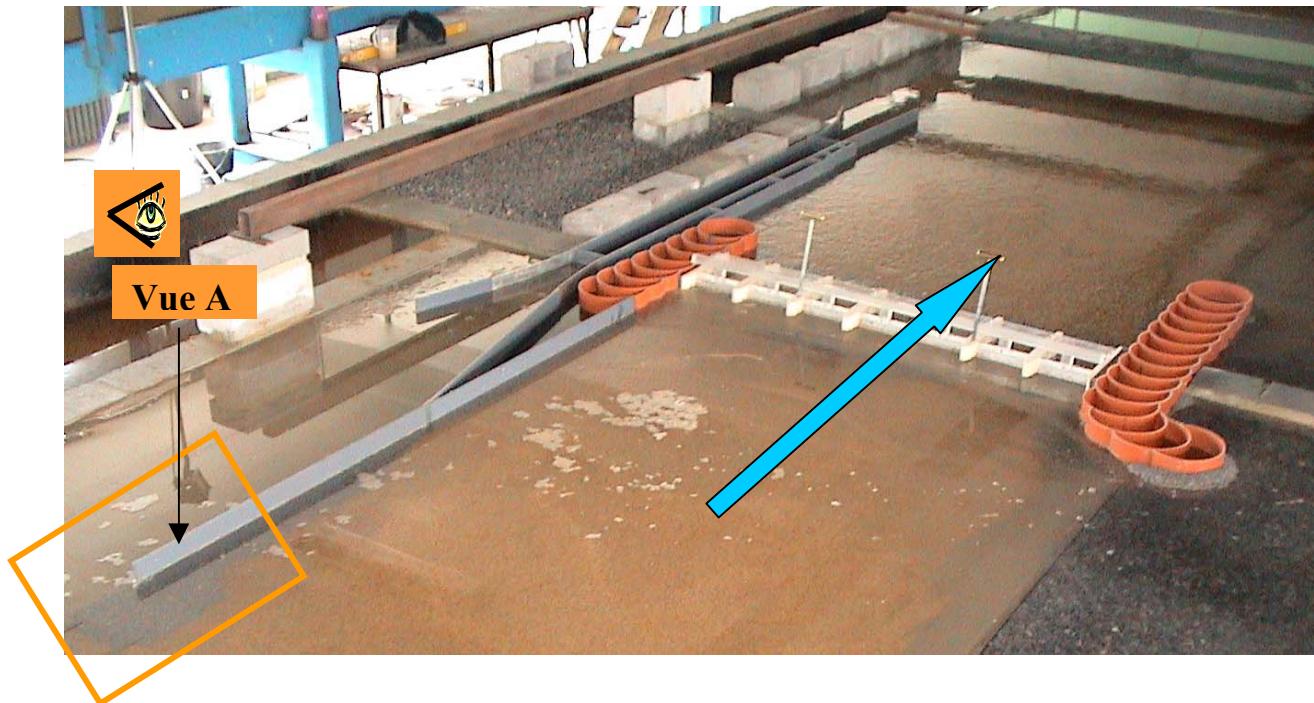


Figure 86 : Schéma de la prise de vue A

❖ 1000 m³/s

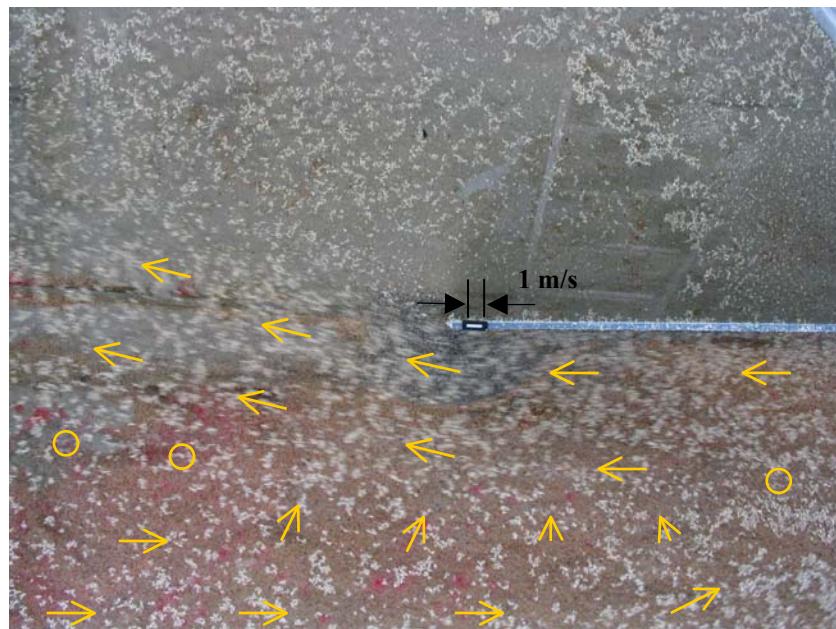


Figure 87 : Entonnement amont (vue A) – Q = 1000 m³/s

❖ 1500 m³/s



Figure 88 : Entonnement amont (vue A) – Q = 1500 m³/s

❖ 2000 m³/s

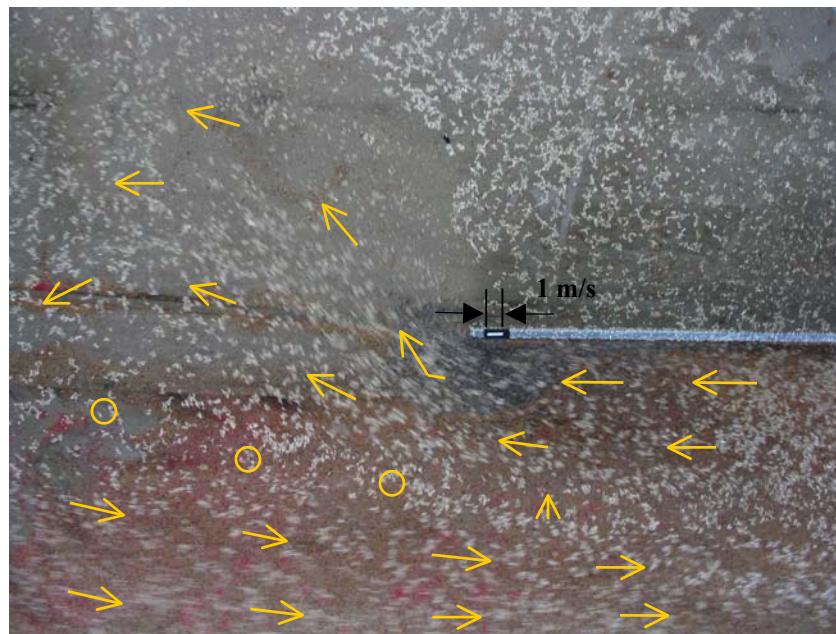


Figure 89 : Entonnement amont (vue A) – Q = 2000 m³/s

❖ 3000 m³/s



Figure 90 : Entonnement amont (vue A) – Q = 3000 m³/s

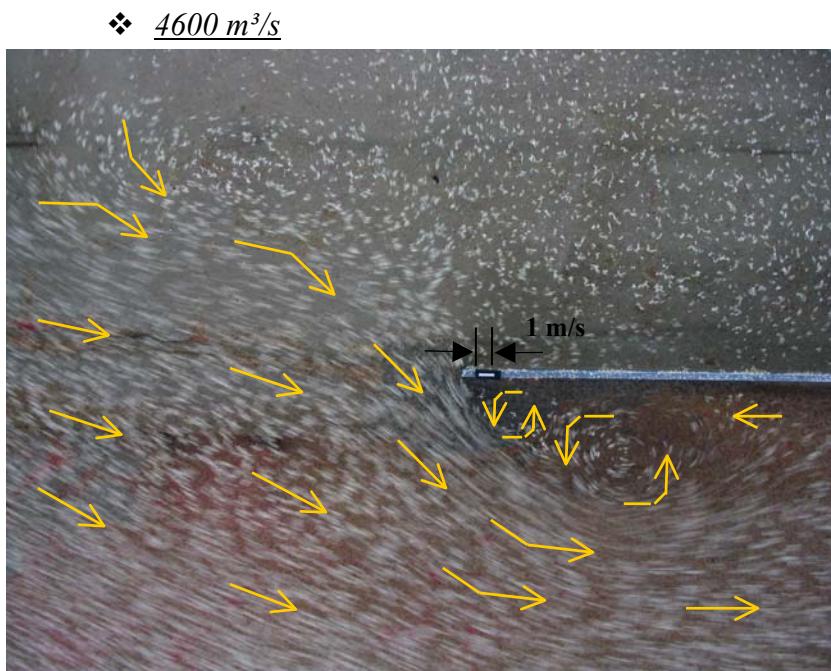


Figure 91 : Entonnement amont (vue A) – $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 92 : Entonnement amont (vue A) – $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$

❖ Conclusion

Les conditions de navigation sont saines (vitesse $< 0,5 \text{ m/s}$) jusqu'à des débits de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Au-delà, elles deviennent plus dangereuses.

5.3.2. Champs de vitesses à l'aval de la culée rive droite

De même que pour l'entonnement amont, la prise de vue « B » ne couvre qu'une zone limitée du champ de courant à l'aval de la culée. N'ayant pas observé de courants inverses comme dans le cas précédent, nous n'avons pas surchargé les images avec des flèches supplémentaires. La seule flèche bleue sur les images indique néanmoins la direction et le sens principal du courant.

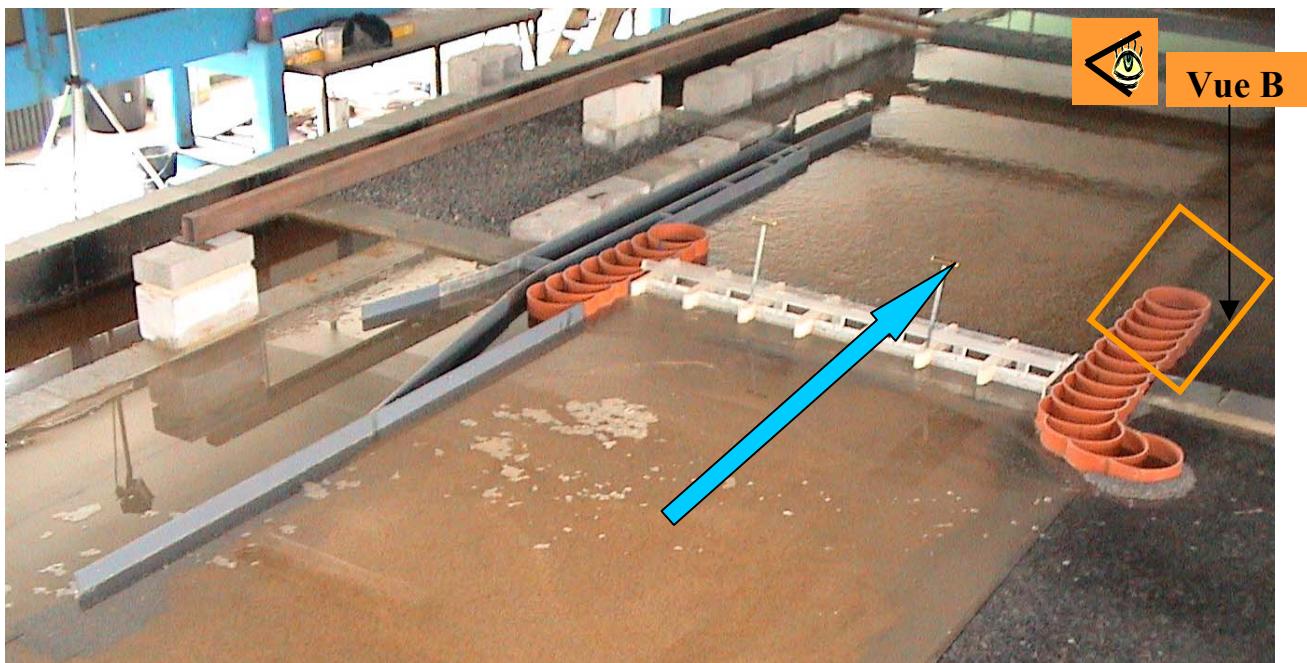


Figure 93 : Schéma de la prise de vue B

❖ $1000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 94 : Culée rive droite aval (Vue B) – $Q = 1000\text{m}^3/\text{s}$

❖ 1500 m³/s



Figure 95 : Culée rive droite aval (Vue B) – Q = 1500 m³/s

❖ 2000 m³/s



Figure 96 : Culée rive droite aval (Vue B) – Q = 2000 m³/s

❖ 3000 m³/s

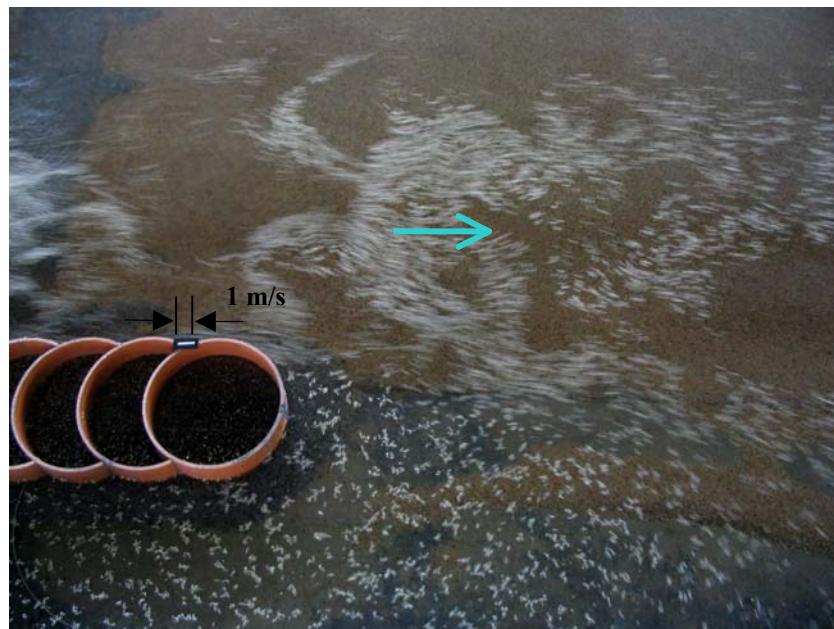


Figure 97 : Culée rive droite aval (Vue B) – Q = 3000 m³/s

❖ 4600 m³/s

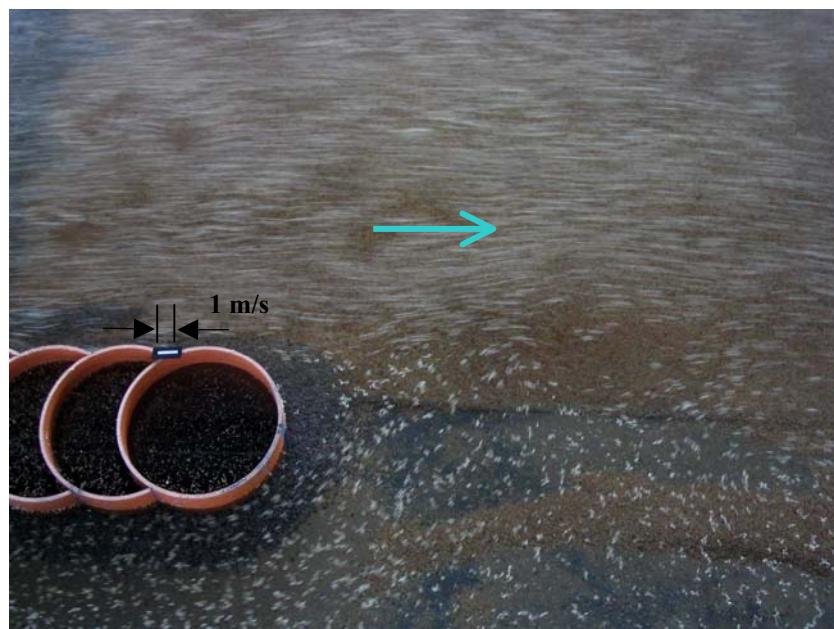


Figure 98 : Culée rive droite aval (Vue B) – Q = 4600 m³/s

❖ 6600 m³/s



Figure 99 : Culée rive droite aval (Vue B) – Q = 6600 m³/s

❖ Conclusion

Les champs de vitesses rencontrés expliquent l'érosion et les dépôts de sédiments en aval de la culée (voir figures 76 et 77). La culée et ses fondations ne sont pas mises en danger.

5.3.3. Visualisation de l'écoulement aux abords des différents ouvrages

Afin de montrer le comportement des écoulements aux abords des différents ouvrages, une série de clichés ont été réalisés. Ils montrent les écoulements à divers endroits de l'ouvrage, sous plusieurs angles de vue différents et sous chacun des débits habituellement rencontrés lors de l'étude.

(Chacun de ces clichés est couplé à de petits films vidéo disponibles sur un support annexe)

Vue 1 : Ecoulement le long de la culée aval rive droite

Vue 2 : Ecoulement à l'approche de la culée amont rive gauche

Vue 3 : Ecoulement aux abords de l'extrémité de l'entonnement amont de l'écluse

Vue 4 : Ecoulement le long et à l'extrémité de l'entonnement aval de l'écluse

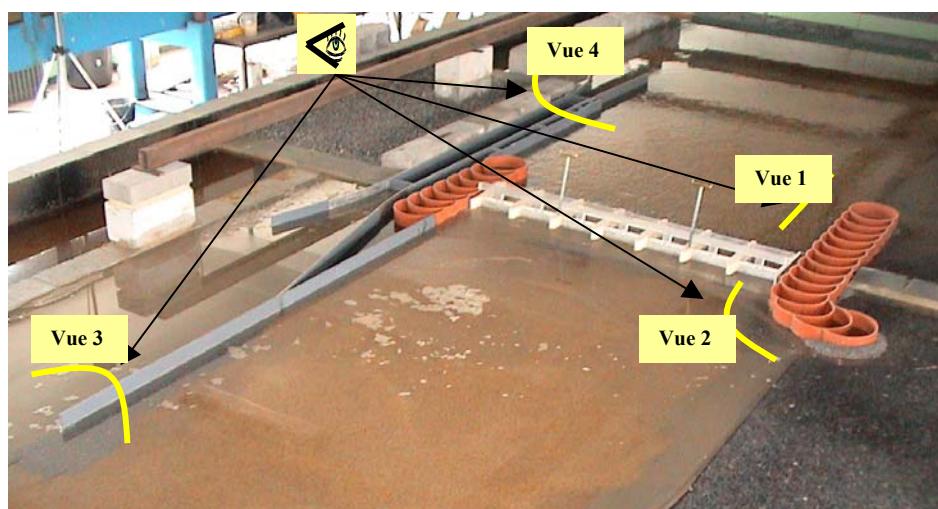


Figure 100 : Visualisation de l'écoulement - Schéma des prises de vue 1 à 4

Vue 5 : Ecoulement en sortie des 7 passes de l'évacuateurs (vue dans l'axe)

Vue 6 : Ecoulement à l'aval de la culée rive gauche

Vue 7 : Ecoulement en sortie des 7 passe de l'évacuateurs (vue plongeante)

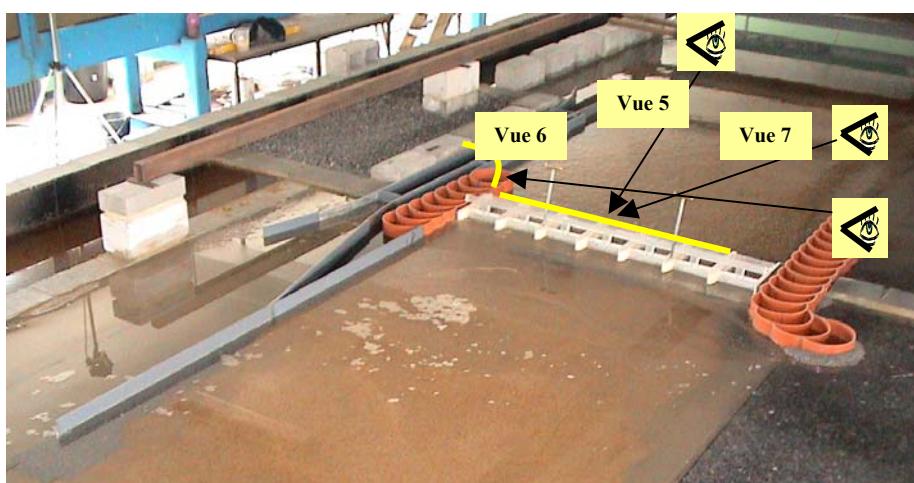


Figure 101 : Visualisation de l'écoulement - Schéma des prises de vue 5 à 7

❖ $1500 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 102 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »



Figure 103 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »



Figure 104 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »



Figure 105 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »

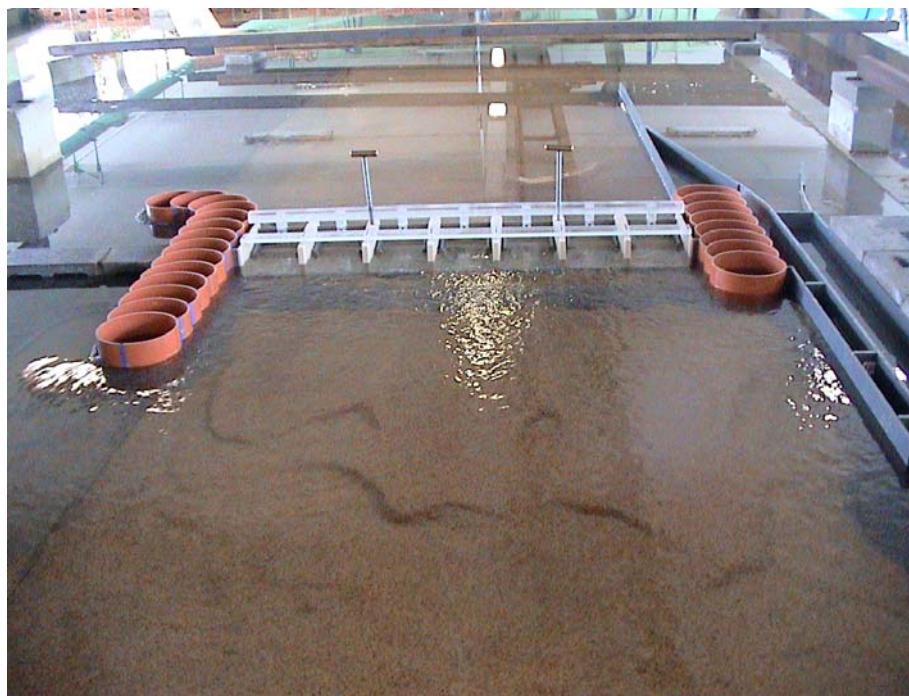


Figure 106 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »



Figure 107 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »



Figure 108 : $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »

❖ $2000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 109 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »

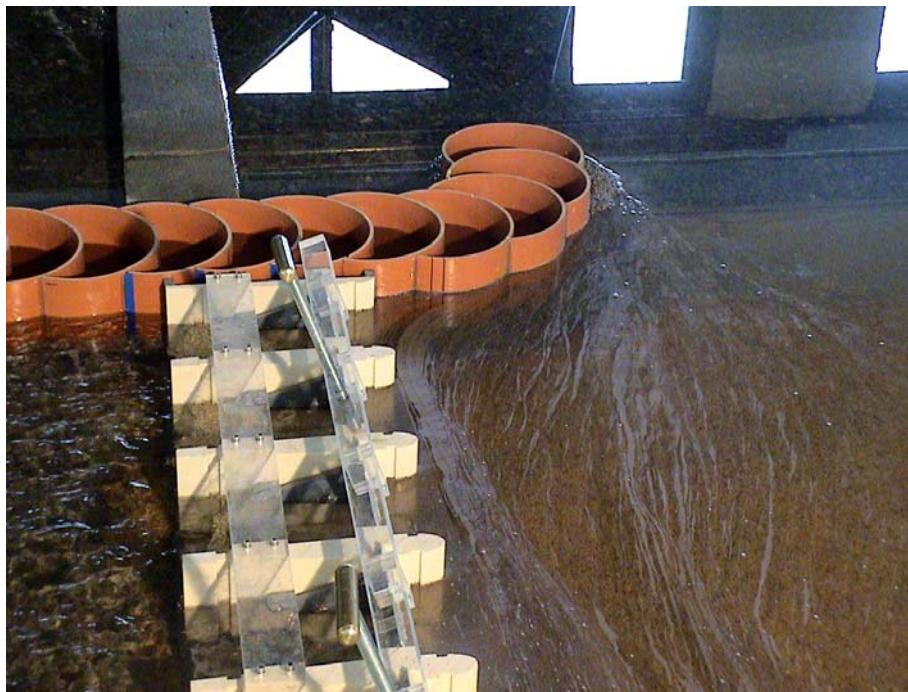


Figure 110 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »



Figure 111 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »

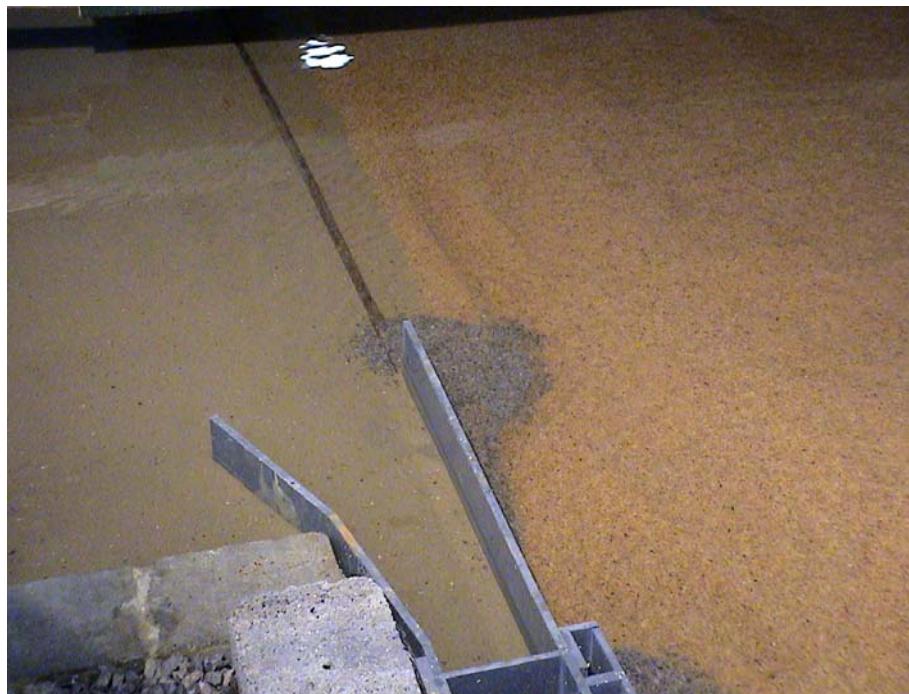


Figure 112 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »



Figure 113 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »



Figure 114 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »



Figure 115 : $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »

❖ $3000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 116 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »



Figure 117 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »

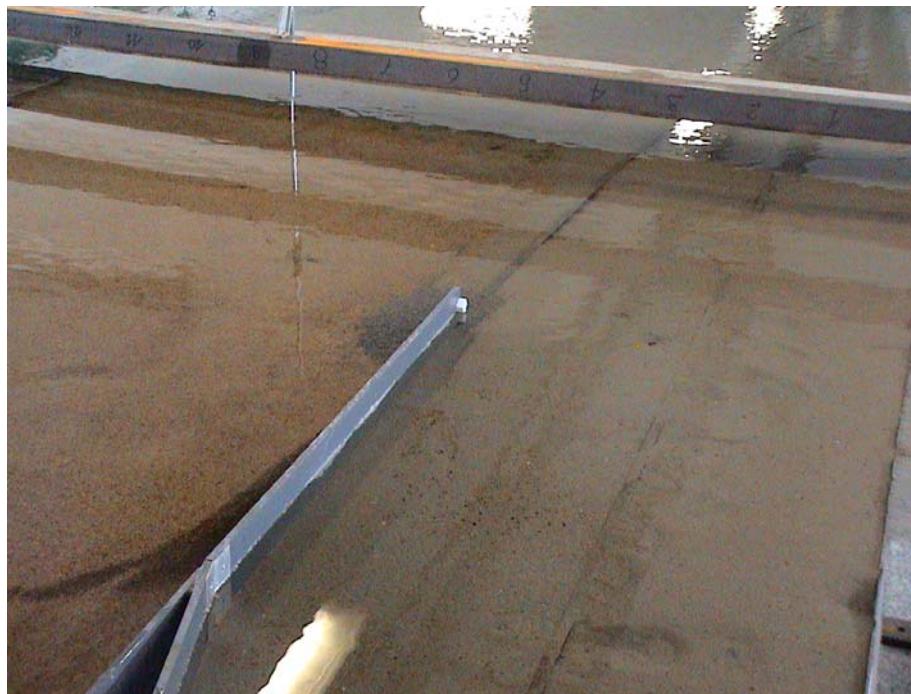


Figure 118 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »



Figure 119 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »

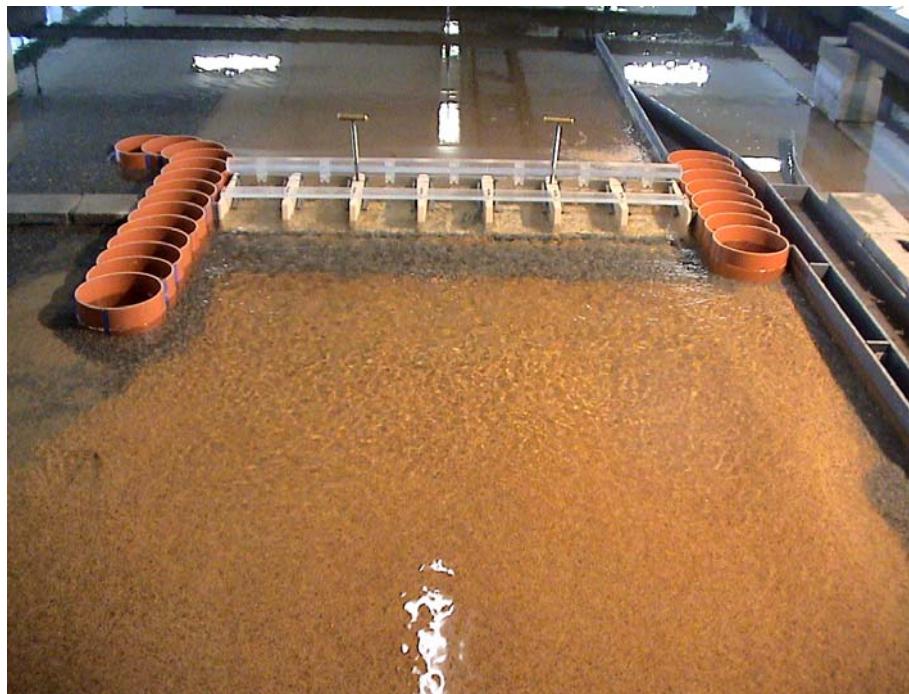


Figure 120 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »



Figure 121 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »



Figure 122 : $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »

❖ $4600 \text{ m}^3/\text{s}$



Figure 123 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »

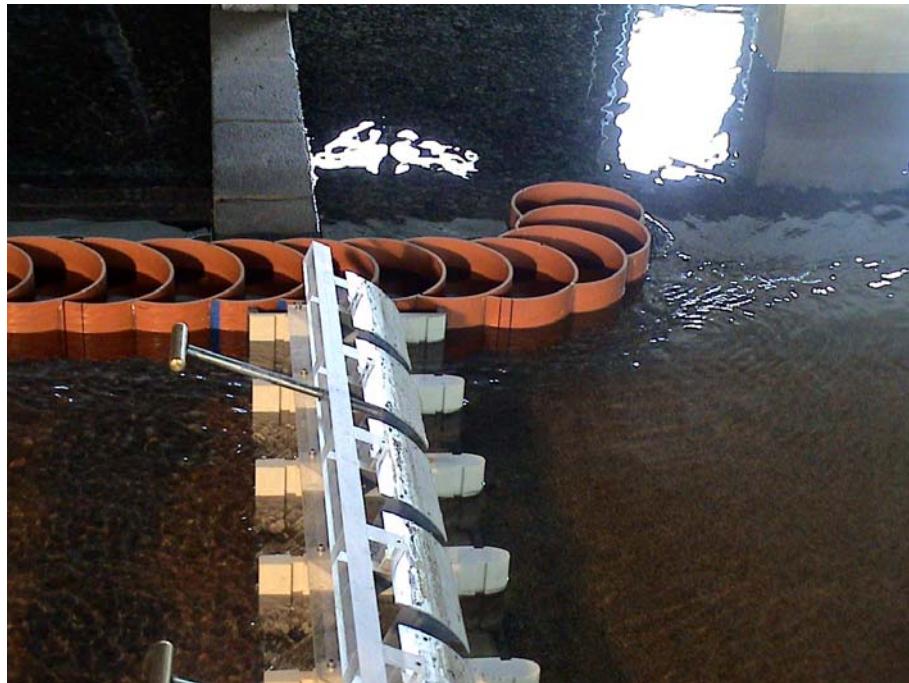


Figure 124 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »



Figure 125 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »

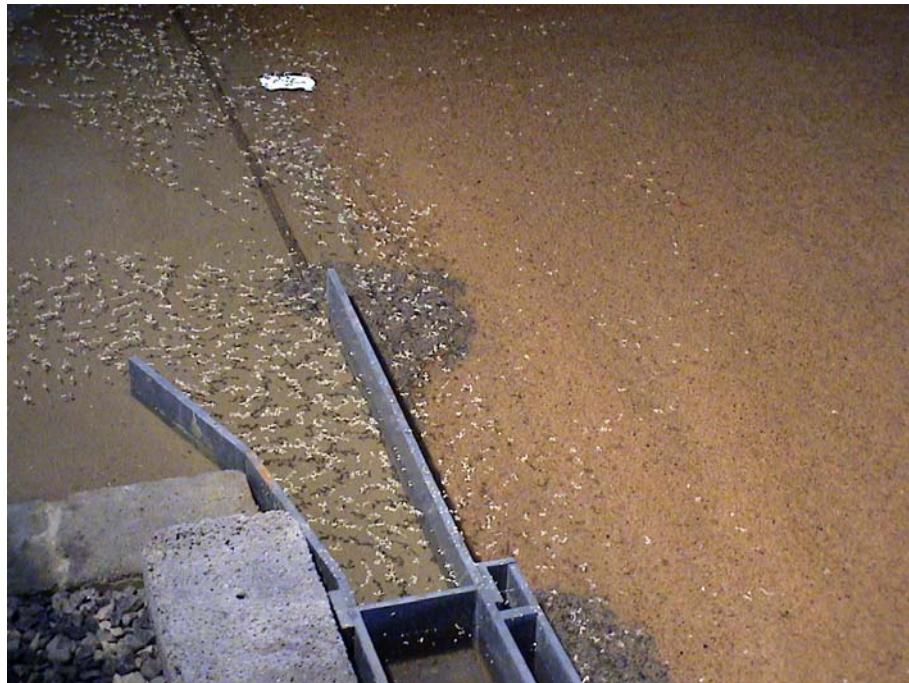


Figure 126 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »



Figure 127 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »



Figure 128 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »

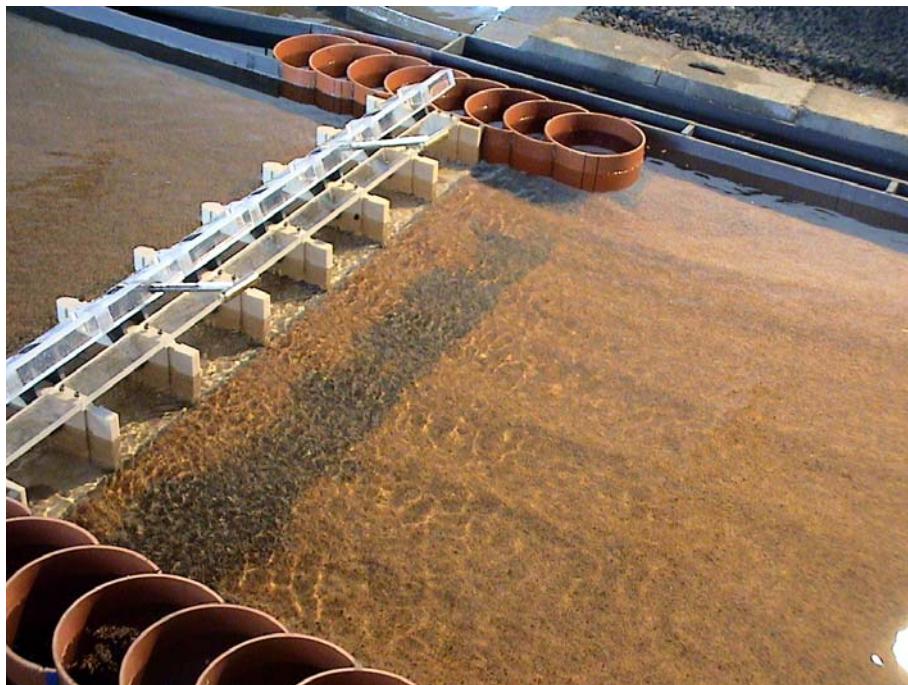


Figure 129 : $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »

❖ $6600 \text{ m}^3/\text{s}$

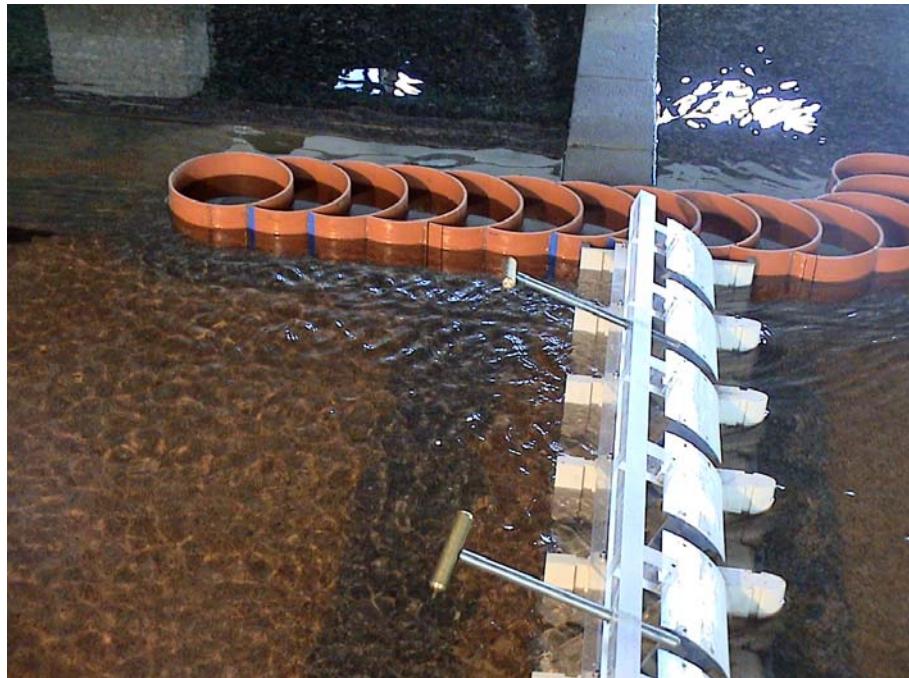


Figure 130 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 1 »



Figure 131 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 2 »



Figure 132 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 3 »

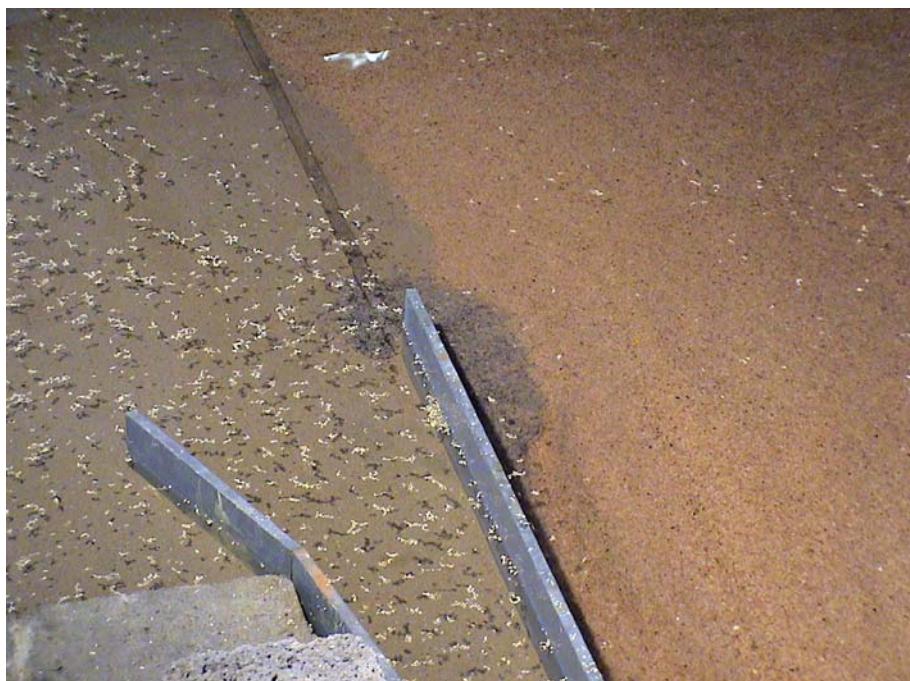


Figure 133 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 4 »



Figure 134 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 5 »



Figure 135 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 6 »

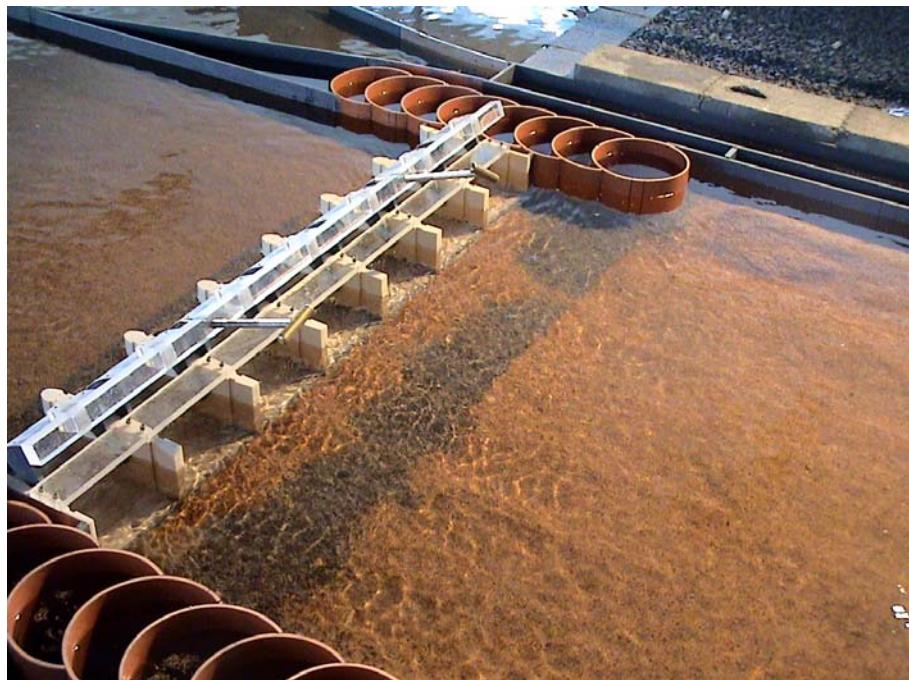


Figure 136 : $Q = 6600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ecoulement « Vue 7 »

❖ *Conclusion*

L'examen des figures 100 à 136 montre que l'écoulement reste stable et peu sujet à remous jusqu'à des débits de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, on observe des turbulences plus importantes et particulièrement juste à l'aval des vannes. Même pour des débits de $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ à $6600 \text{ m}^3/\text{s}$, les écoulements autour des culées restent « fluides ». Au-delà de $6600 \text{ m}^3/\text{s}$, on peut s'attendre à des turbulences importantes.