

Effet des indentations des sauts de ski sur la fosse d'érosion en aval des évacuateurs de crue de barrage

Sylvain BOURGEOIS

Promoteur : Mr le professeur Pirotton

Travail de fin d'études présenté en
vue de l'obtention du grade
d'ingénieur civil des constructions

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Pirotton, mon promoteur, pour les sujets variés de TFE qu'il proposa et pour les conseils théoriques qu'il me prodigua.

Un tout grand merci à Sébastien Erpicum pour ses multiples conseils techniques à propos de mon modèle, ses réflexions théoriques, son suivi de mes essais au laboratoire, sa disponibilité tout au long de mon mémoire ainsi que sa patience à répondre à toutes mes questions.

Je remercie chaleureusement Alain Dewart, Didier Lallemand, Denis Stouvenakers et Maurice Salme, les techniciens du laboratoire, qui ont toujours répondu favorablement à mes requêtes simples ou compliquées. Merci aussi pour la bonne humeur que vous mettiez au laboratoire pendant mes essais.

Je tiens aussi à remercier tout le service du HACH et plus spécialement Nicolas Brasseur pour son aide dans la mise en place du cadre laser et de ses réparations ; Damien Noël pour ses connaissances des sondes de vitesse et de hauteur d'eau ; François Kerger pour ses connaissances sur les sondes de pression et enfin Mathieu Dufresne, travaillant sur son projet au laboratoire mais ayant pris le temps de me conseiller de nombreuses fois lors de mes essais.

Merci à Monsieur Mouzelard pour l'intérêt qu'il porta à mes essais lors de sa visite au laboratoire.

Merci à mes parents, Dominique et Albert, de m'avoir donné la possibilité de faire de telles études, pour leur soutien tout au long de ces cinq ans et pour leur relecture. Merci à ma grand-mère Sylvaine pour ses encouragements. Merci à ma sœur Catherine et à mon frère Jacques pour leur calme pendant les nombreux blocus. Merci à mon oncle Max pour sa relecture et pour l'aide apportée lors de la nuit passée au laboratoire. Enfin, merci à Frédérique pour ses bonnes idées et sa présence quotidienne dans les bons comme dans les moins bons moments de nos études.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 : Contexte	2
1.1 Les barrages	2
1.2 Les évacuateurs de crue et les dissipateurs d'énergie	5
1.3 Le saut de ski et sa fosse d'érosion.....	9
1.3.1 Le saut de ski	9
1.3.2 La fosse d'érosion.....	10
1.3.2.1 Rappels sur l'érosion	10
1.3.2.2 Approche physique	11
1.3.2.3 Approche théorique	12
1.3.2.4 De l'utilité des modèles réduits	13
1.3.2.5 Moyens de remédiation de la fosse.....	13
1.3.3 Les indentations de sauts de ski.....	14
Chapitre 2 : Expérimentation	16
2.1 Modèle réduit.....	16
2.1.1 Ancien modèle.....	16
2.1.2 Modèle utilisé	17
2.1.3 Forme des indentations.....	18
2.1.4 Débit.....	19
2.2 Cas étudiés	21
2.2.1 Comparaison des cas selon les coûts des matériaux.....	22
2.2.2 Comparaison des cas selon la technique	23
2.3 Paramètres étudiés	25
2.3.1 La fosse d'érosion.....	25
2.3.1.1 Télémètre laser.....	25
2.3.1.1.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement.....	25
2.3.1.1.2 Support.....	26
2.3.1.2 Caractéristiques observées	27
2.3.2 Dissipation d'énergie au sein du modèle	33
2.3.2.1 Energie de l'écoulement et théorème de Bernoulli.....	33
2.3.2.2 Sondes de distance	35
2.3.2.2.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement.....	35
2.3.2.2.2 Support.....	36
2.3.2.3 Sondes de vitesse.....	38
2.3.2.4 Traitement des données	39
2.3.3 Répartition du débit sur les indentations.....	41
2.3.4 Etude des jets	42
2.3.5 Etude du champ de pression sous les jets.....	42
2.3.5.1 Sondes de pression.....	42
2.3.5.1.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement.....	42
2.3.5.1.2 Support.....	43
2.3.5.2 Traitement des données	44
2.4 Protocole expérimental	47
2.5 Résultats	49
2.5.1 De la reproductibilité des essais	49
2.5.2 Paramètres de la fosse.....	49
2.5.2.1 De la reproductibilité des essais d'érosion	51
2.5.2.2 Etude des volumes, surfaces et profondeurs	52

2.5.2.2.1	A débit constant.....	53
2.5.2.2.2	A débit variable.....	56
2.5.2.3	Etude de $D_{intacte}$ et D_{max}	58
2.5.2.4	Etude de la forme des fosses	59
2.5.2.4.1	A débit constant.....	59
2.5.2.4.2	A débit variable.....	63
2.5.2.5	Etude des pentes des fosses	64
2.5.2.6	Classement des fosses.....	66
2.5.3	Dissipation d'énergie au sein du modèle réduit	70
2.5.4	Répartition du débit sur les indentations.....	72
2.5.5	Etude des jets	76
2.5.6	Etude du champ de pression sous les jets.....	80
2.5.6.1	De la reproductibilité des essais et de la symétrie du champ de pression	80
2.5.6.2	Etude des pressions.....	81
2.5.7	Synthèse des essais	87
2.5.7.1	A débit constant.....	87
2.5.7.2	A débit variable.....	91
Conclusions générales et perspectives		92
Bibliographie		94
Annexes		96
Sondes de distance Mic+25/IU/TC de la firme <i>Microsonic</i> [3]		96
Sondes de vitesses 403 et 404 de la firme « <i>Nixon Flowmeters Ltd</i> » [5].....		98
Sondes de pression PR-41PRO de la firme <i>Keller</i> [11]		100

Table des figures

Figure 1 : Barrage homogène [6]	3
Figure 2 : Barrage à noyau [6]	3
Figure 3 : Barrage à masque [6]	3
Figure 4 : Barrage en béton, type poids [6]	3
Figure 5 : Barrage en béton, type voûte [6]	4
Figure 6 : Macro-rugosité à Hastiche, Belgique [1]	6
Figure 7 : Marches de l'évacuateur du barrage de La Grande, Québec, Canada [8]	6
Figure 8 : Bassins de dissipation du futur barrage de Taoussa, Mali	7
Figure 9 : Seuil libre du barrage du Passet, Pyrénées orientales, France [9]	7
Figure 10 : Saut de ski et indentations en bout de pente	7
Figure 11 : Diffuseur en vanne de fond, barrage de Schifffen, Fribourg, Suisse [7]	7
Figure 12 : Jets contrariés spatialement [IV]	8
Figure 13 : Barrage et saut de ski de Marèges, Corrèze, France [10]	9
Figure 14 : Schéma du creusement d'une fosse d'érosion	12
Figure 15 : Evacuateur de crue et indentations du barrage de Gosau, Oberösterreich, Autriche [X]	15
Figure 16 : Evacuateur de crue de l'ancien modèle, $Q = 60 \text{ l/s}$	17
Figure 17 : Modifications de l'ancien modèle	17
Figure 18 : Indentations en bout de canal	18
Figure 19 : Canal et bac à graviers	18
Figure 20 : Schéma du bassin de dissipation	18
Figure 21 : Forme des indentations	19
Figure 22 : Régulation par étranglement [II]	20
Figure 23 : Régulation à vitesse variable [I]	20
Figure 24 : Coupe en bout de canal des différents cas	21
Figure 25 : Variations géométriques du cas 5	22
Figure 26 : Télémètre laser PD25	26
Figure 27 : Cadre de mesures laser	27
Figure 28 : Principe de calcul de la fosse d'érosion (cas 3)	28
Figure 29 : Paramètres de base de la fosse (cas 3)	29
Figure 30 : D_{intacte} (cas 4)	30
Figure 31 : Explications sur les paramètres calculés de la fosse	31
Figure 32 : Schéma du modèle réduit du laboratoire	34
Figure 33 : Sonde de distance mic25+/IU/TC	36
Figure 34 : Exemple de calibrage d'une sonde mic25+/IU/TC	37
Figure 35 : Sonde de distance sur l'évacuateur de crue, à l'amont des indentations	37
Figure 36 : Sondes de distance à l'aval de la fosse	38
Figure 37 : Sondes 403 et 404 [5], fréquencemètre	39
Figure 38 : Schéma du traitement des données de hauteur, cas 1, sonde aval droite	40
Figure 39 : Position des sondes (inclinées à gauche et à plat à droite)	41
Figure 40 : Angles d'impacts des jets (cas 2 à gauche et cas 5 à droite)	42
Figure 41 : Transmetteur de pression PR-41PRO	43
Figure 42 : Disposition des sondes de pression	44
Figure 43 : Cavaliers fixés sur la plaque de contreplaqué	44
Figure 44 : Mesure de la sonde 1, cas 2	45
Figure 45 : Histogramme des mesures de la sonde 1, cas 2	45
Figure 46 : Mesures et Droite de Henry, sonde 1, cas 2	46
Figure 47 : Moyenne et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2	46
Figure 48 : Fosses des cas 3 (gauche) et 10 (droite)	51
Figure 49 : Comparaison des volumes à débit constant	53
Figure 50 : Comparaison des surfaces à débit constant	54
Figure 51 : Volumes et surfaces pour des fosses atteignant le fond du bac	54
Figure 52 : Comparaison des profondeurs absolues à débit constant	55
Figure 53 : Comparaison des profondeurs relatives à débit constant	55

Figure 54 : « Volume-Profondeur Relative » pour Q60	56
Figure 55 : « Surface-Profondeur Relative » pour Q60	56
Figure 56 : "V-Q" pour cas 2 et 5.....	57
Figure 57 : "S-Q" pour cas 2 et 5.....	57
Figure 58 : "P _{rel} -Q" pour cas 2 et 5	57
Figure 59 : Comparaison des D _{intacte} à débit constant	58
Figure 60 : Comparaison des D _{intacte} à débit variable	58
Figure 61 : Comparaison des D _{max} à débit constant.....	59
Figure 62 : Comparaison des D _{max} à débit variable	59
Figure 63 : Cas 1, forme ovale	60
Figure 64 : Cas 3, forme ovale	60
Figure 65 : Cas 4, forme ovale	60
Figure 66 : Cas 6, forme ovale	60
Figure 67 : Cas 5, forme ronde	61
Figure 68 : Cas 8, forme « ovale à ronde »	61
Figure 69 : Cas 2, forme trapézoïdale.....	61
Figure 70 : Longueurs et largeurs des fosses à débit constant	62
Figure 71 : Rapport L/l des fosses à débit constant.....	62
Figure 72 : "L/l"- "Profondeur relative" à débit constant.....	63
Figure 73 : Cas 11, forme rectangulaire	63
Figure 74 : Cas 12, forme rectangulaire	63
Figure 75 : Cas 2, forme rectangulaire	63
Figure 76 : Cas 13, forme "double-ovale"	64
Figure 77 : Cas 14, forme "double-ovale"	64
Figure 78 : Cas 14, forme ronde.....	64
Figure 79 : Rapport L/l à débit variable	64
Figure 80 : Pentes des fosses à débit constant.....	65
Figure 81 : Pentes de la fosse à débit variable	66
Figure 82 : Points totaux des fosses à débit constant.....	67
Figure 83 : Energie à l'amont du bac à graviers	70
Figure 84 : Energie à l'aval du bac à graviers	70
Figure 85 : Vitesses et hauteurs d'eau dans le canal pour le cas 1	72
Figure 86 : Ondes transversales dans le canal d'évacuation	73
Figure 87 : Répartition du débit sur les indentations	74
Figure 88 : Calcul des longueurs et largeurs de la zone d'impact (cas 2 à gauche et 5 à droite)	76
Figure 89 : Jets des cas 3 (gauche), 4 (centre) et 6 (droite)	77
Figure 90 : Jets des cas 7 (gauche), 8 (centre) et 9 (droite)	78
Figure 91 : Jets du cas 15	78
Figure 92 : Emplacement des sondes pour le test de symétrie	80
Figure 93 : Double essai de pression pour le cas 15	80
Figure 94 : Disposition des sondes de pression	81
Figure 95 : Moyenne et intervalles à 95,5% des pressions, cas 2, x = 170 cm	81
Figure 96 : Moyenne et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2, x = 150 cm	82
Figure 97 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 1 à 6, 9 et 15	83
Figure 98 : Schéma de l'emplacement réel des sondes par rapport à ceux voulus	84
Figure 99 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2 et 3	84
Figure 100 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 5 et 6	85
Figure 101 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 4 et 9	85
Figure 102 : Répartition du débit sur les indentations	88

Table des tableaux

Tableau 1 : Cas avec débit variable.....	22
Tableau 2 : Estimation du coût des différents cas	22
Tableau 3 : Estimation de la complexité des différents cas	23

Tableau 4 : Equations des abaques des sondes de vitesse	39
Tableau 5 : Résultats des fosses	50
Tableau 6 : Paramètres des cas 3 et 10.....	51
Tableau 7 : Intervalles de validité pour les cas 3 et 10.....	52
Tableau 8 : Formes des fosses à débit constant.....	59
Tableau 9 : Classement des fosses à débit constant.....	67
Tableau 10 : Points totaux des fosses à débit variable	68
Tableau 11 : Paramètres des jets à débit constant.....	79
Tableau 12 : Distances entre les sondes de pression et le fond des fosses.....	81
Tableau 13 : Emplacement de la sonde de pression n°2 pour chaque cas	82
Tableau 14 : Volume et forme des fosses à débit constant	87
Tableau 15 : Paramètres des jets à débit constant.....	87

Introduction

Actuellement, grâce à la prise de conscience environnementale grandissante, la recherche d'énergies renouvelables est en pleine croissance. Ces nouvelles énergies se focalisent sur la production de chaleur (panneaux solaires thermiques, pieux échangeurs de chaleur...) et d'électricité (centrales hydroélectriques, panneaux photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles...). Pour produire de l'électricité à partir d'eau, il est nécessaire de créer une chute et d'avoir toujours de l'eau en abondance. La construction d'un barrage et la création d'une retenue sont les meilleurs moyens pour atteindre ces objectifs. Un barrage peut aussi avoir d'autres usages tels que l'irrigation ou l'écrêtage de crues. Des évacuateurs de crue et des dissipateurs d'énergie sont associés à ces barrages pour évacuer le trop-plein d'eau et réduire son énergie à l'aval ; parmi ceux-ci le type « saut de ski » est utilisé, il engendre une fosse d'érosion en aval où se dissipe l'énergie. Il convient toutefois de maîtriser l'ampleur de cette fosse au risque de perdre les gains environnementaux obtenus dans la production d'électricité renouvelable par la destruction d'une partie du lit de la rivière. Pour diminuer ces dommages, il est possible de placer des indentations de la forme du saut de ski à la place de celui-ci.

Le thème de ce travail est donc l'étude de l'effet de ces indentations sur la fosse d'érosion. Les objectifs sont de déterminer expérimentalement les paramètres principaux qui influencent la fosse d'érosion et de trouver une combinaison efficace d'indentations. L'étude est réalisée à partir d'un modèle réduit d'évacuateur de crue au laboratoire d'hydraulique des constructions de l'université de Liège.

Ce travail comporte deux parties. La première partie présente les rôles des barrages, des évacuateurs de crue et des dissipateurs d'énergie ; elle aborde ensuite le saut de ski, avec ou sans indentations, combiné à une fosse d'érosion à l'aval. La seconde partie traite de l'étude expérimentale dans laquelle les points suivants sont abordés : la description du modèle réduit, les différents géométries et débits testés, les paramètres mesurés pendant et après les essais pour caractériser la fosse et l'écoulement, le protocole expérimental et enfin l'étude complète de tous les résultats.

Chapitre 1 : Contexte

Je vais d'abord aborder la thématique des barrages et de leurs différents modes de fonctionnement. Ensuite je parlerai de la nécessité de placer des évacuateurs de crue et puis je traiterai du problème de la dissipation d'énergie le long ou à l'aval de ces évacuateurs. Enfin, le cas du saut de ski et de sa fosse d'érosion sera abordé.

1.1 Les barrages

Un barrage est un édifice permettant d'accumuler une grande quantité d'eau en un endroit. Cette eau peut être destinée à de multiples usages : l'irrigation (barrage Ataturk en Turquie), l'alimentation en eau potable (barrage de la Gileppe près de Verviers), la production d'hydroélectricité (barrage de Robertville près de Malmédy), l'écrêtage de crues, les activités nautiques...

Un barrage doit d'une part résister à la poussée de l'eau grâce à son poids (barrage poids) ou par une transmission des efforts vers les flancs de la vallée (barrage voûte). Il doit d'autre part retenir cette eau via un système global d'étanchéité : dans le barrage et dans le sol environnant grâce à un rideau d'injections (verticales sous le barrage et obliques sur les côtés).

Les barrages peuvent être séparés selon leurs matériaux [6] : des remblais (terres, roches) ou du béton.

Les barrages en remblais sont intéressants en présence d'un sol de faible résistance (ayant donc tendance à s'affaisser) puisque ceux-ci sont faits en matériaux assez souples qui s'adaptent aux déformations de l'assise (jusqu'à une certaine limite). Nous pouvons distinguer trois types de barrage en remblai résistant à l'eau grâce à leur poids (appelés barrages poids souples) :

- le barrage homogène composé d'un matériau homogène peu perméable (de l'argile souvent)
- le barrage à noyau composé d'un noyau très peu perméable sur lequel sont placées des couches de terre ou de roches
- le barrage à masque composé d'enrochements recouverts, du côté amont, d'un masque de béton, de ciment ou encore de béton bitumineux

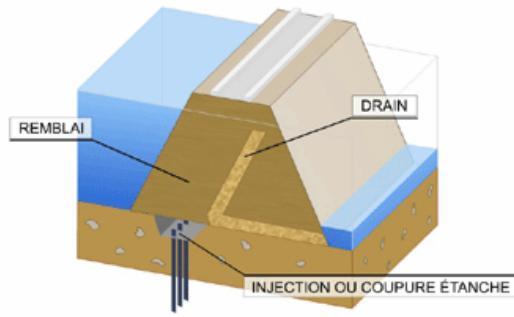


Figure 1 : Barrage homogène [6]

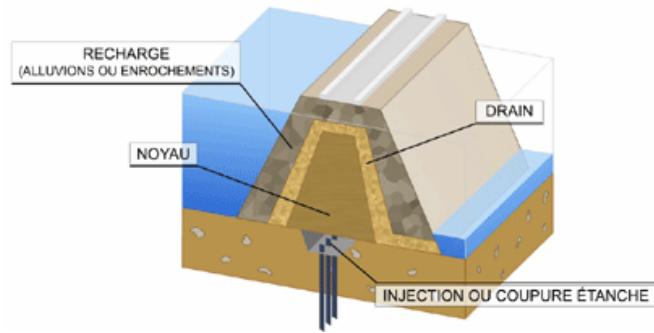


Figure 2 : Barrage à noyau [6]

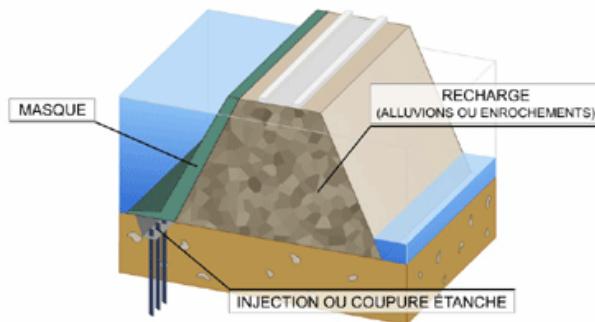


Figure 3 : Barrage à masque [6]

Les barrages en béton sont rigides et nécessitent donc des sols peu déformables. Il en existe deux types [6] :

- le barrage poids, de forme triangulaire, résistant à l'eau grâce au frottement engendré par son poids sur le sol
- le barrage voûte qui agit comme un arc comprimé et qui transmet les efforts vers les parois de la vallée, ce type de barrage requiert les roches les plus solides mais permet de faire une économie de béton par rapport au barrage poids

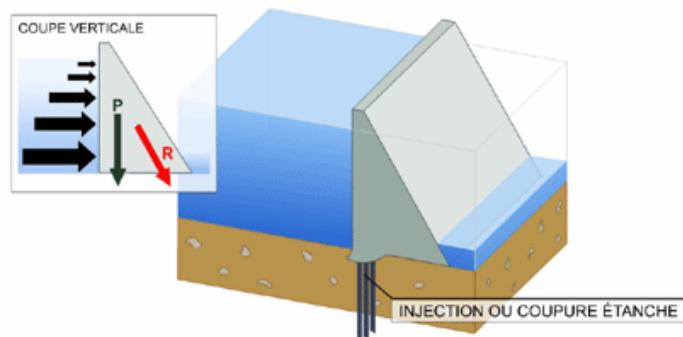


Figure 4 : Barrage en béton, type poids [6]

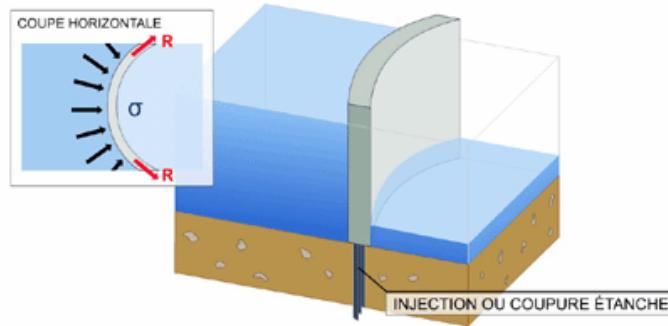


Figure 5 : Barrage en béton, type voûte [6]

Des variantes de ces barrages en béton pour diminuer la quantité de béton à mettre en œuvre sont possibles : le barrage à contreforts qui est un barrage poids allégé de l'intérieur et le barrage à voûtes multiples reposant sur des appuis intermédiaires lorsque la vallée est trop large pour une seule voûte [6].

Tout barrage comprend une multitude d'éléments connexes dont les principaux sont :

- l'évacuateur de crue qui permet d'évacuer les débits excédentaires lorsque la retenue atteint un niveau limite
- la vanne de surface qui permet d'écrêter les crues ne dépassant pas la cote limite
- la vanne de fond qui permet de réguler le débit à l'aval du barrage, de faire des chasses pour enlever une partie des sédiments de la retenue et de vider la retenue en cas de besoin
- la centrale hydroélectrique qui transforme l'énergie de l'eau en électricité

1.2 Les évacuateurs de crue et les dissipateurs d'énergie

L'évacuateur de crue est une des pièces les plus importantes du barrage. Il permet à la retenue de ne pas atteindre une hauteur d'eau critique et d'éviter le submersion lors d'une crue. Sa fonction est donc d'évacuer l'eau excédentaire de la retenue et de l'envoyer vers l'aval. L'écoulement dans un évacuateur doit toujours se faire à surface libre afin qu'un éventuel dépassement du débit théorique de l'évacuateur n'entraîne pas un débordement par dessus le barrage. Ce débordement n'est pas nécessairement dangereux pour les barrages en béton parce que ceux-ci peuvent être assez solides pour résister à la pression d'eau supplémentaire (en 1963, un pan de la retenue du barrage du Vajont en Italie créa une vague qui le submergea et causa 1917 décès dans la vallée tandis que le barrage restait presque intact). A l'inverse, la ruine est quasi assurée pour les barrages en remblais soumis au débordement. En effet, l'eau, une fois la crête du barrage passée, va éroder le parement aval de l'enrochement et créer une brèche dans laquelle toute la retenue s'écoulera.

Un bon évacuateur de crue doit être construit de manière à fonctionner automatiquement. Cette mesure permet d'éviter tout aléa dans son fonctionnement : personnel absent, mécanisme grippé, défaillance quelconque... De cette façon, le risque de voir le barrage se rompre, suite à une crue, est minimisé.

On distingue deux types d'évacuateurs :

- ceux situés dans la structure même du barrage ;
- ceux qui sont indépendants de celui-ci et déversent l'eau de la retenue à l'aval du barrage ou dans une vallée parallèle.

Pour ceux construits dans le barrage, on différencie les évacuateurs de surface et de fond (on parle alors de vannes de fond). Il est évident que les vannes de fond ne peuvent être considérées comme de vrais évacuateurs de crue vu le mécanisme complexe les régissant et le fait qu'elles ne peuvent pas être automatiques.

Les évacuateurs incorporés dans le barrage sont bien adaptés aux barrages en béton parce qu'ils sont beaucoup moins érodables et sensibles aux vibrations qu'une construction en terre ou en rochers. Les barrages voûte et à contreforts conviennent particulièrement bien car l'eau ne coule pas le long du béton au cours de sa chute et n'induit des effets dynamiques sur le barrage qu'au niveau de l'évacuateur.

Tout évacuateur requiert la construction d'un dissipateur d'énergie, soit sur l'évacuateur soit à son aval, capable de casser l'énergie cinétique acquise par l'eau au cours de sa descente afin de la renvoyer dans le lit naturel de la rivière avec le plus petit pouvoir érosif. Le dissipateur d'énergie va donc aider à préserver les berges et le fond de la rivière et donc maintenir la faune et la flore locale. Il y a plusieurs moyens de briser la force de l'eau [IV] :

- en aménageant l'évacuateur pour que l'eau perde son énergie lors de son passage. On peut soit placer des blocs sur le coursier (c'est-à-dire de la macro-rugosité) soit construire un évacuateur de crue en marches d'escalier.



Figure 6 : Macro-rugosité à Hasticie, Belgique [1]



Figure 7 : Marches de l'évacuateur du barrage de La Grande, Québec, Canada [8]

- en construisant un bassin de dissipation à l'aval de l'évacuateur. On peut soit mettre des blocs sur celui-ci ou le construire avec des surfaces assez rugueuses pour forcer le ressaut à se produire à son niveau.
- en laissant s'écouler l'eau dans le vide à partir d'un seuil libre vers un bassin amortisseur en contrebas



Figure 8 : Bassins de dissipation du futur barrage de Taoussa, Mali



Figure 9 : Seuil libre du barrage du Passet, Pyrénées orientales, France [9]

- en envoyant le jet dans l'air afin qu'il se diffuse spatialement et qu'il perde une partie de son énergie par frottement. C'est le phénomène qui se produit à la sortie d'un saut de ski (avec ou sans indentations) ou après un diffuseur en vanne de fond. Il est aussi possible de se faire rencontrer deux jets pour qu'ils diminuent mutuellement leur énergie : ce sont les jets contrariés spatialement.



Figure 10 : Saut de ski et indentations en bout de pente



Figure 11 : Diffuseur en vanne de fond, barrage de Schiffenen, Fribourg, Suisse [7]



Figure 12 : Jets contrariés spatialement [IV]

Les dissipateurs réels associent bien souvent plusieurs de ces techniques. Ces structures brisant l'énergie de l'eau doivent être très résistantes ou souvent remplacées (les blocs sur les coursiers et les bassins amortisseurs sont soumis à une forte érosion). Il est aussi à noter que le bon fonctionnement de certains dissipateurs dépend du débit y passant :

- dans le cas du saut de ski, si le débit est trop faible, l'écoulement peut passer en infracritique avant d'être éjecté ce qui conduit à transformer ce saut en simple déversoir à seuil libre. Le ressaut produit sur le saut de ski peut aussi être néfaste pour sa stabilité
- dans le cas des jets contrariés spatialement, un débit trop faible peut empêcher la rencontre des jets
- dans le cas d'un bassin de dissipation, si le débit de dimensionnement a été sous-estimé, le ressaut peut se produire à l'aval du bassin et endommager l'aval de la rivière

A l'inverse, le seuil libre, la macro-rugosité ou le diffuseur en vanne de fond assurent une dissipation d'énergie satisfaisante quel que soit le débit.

Comme les dissipateurs d'énergie doivent fonctionner pour une large gamme de débits, il est important que ceux-ci soient bien dimensionnés pour éviter toute surprise lors du fonctionnement réel.

1.3 Le saut de ski et sa fosse d'érosion

J'aborde d'abord le principe du saut de ski et les différents paramètres pour le définir puis je détaillerai le phénomène d'érosion produisant la fosse à l'aval de l'évacuateur de crue et enfin l'implantation d'indentations sur les sauts de ski.

1.3.1 Le saut de ski

Le saut de ski a été imaginé par André Coyne pour des barrages se trouvant dans des vallées très étroites et dans lesquelles il n'était pas possible de construire côte à côte la centrale hydroélectrique et l'évacuateur de crue. Coyne eut alors l'idée de placer un évacuateur de crue, déviant le jet, au-dessus de la centrale. Cet évacuateur prit le nom de « saut de ski » (ou cuillère de dissipation) : il permet d'envoyer le jet bien à l'aval du barrage. Le premier saut de ski fut construit sur le barrage de Marèges en 1931. Dans le cas où l'on désire préserver la base du barrage et où l'on dispose d'un grand espace dans la rivière à l'aval, il est intéressant de construire un tel saut de ski et de considérer le fond de la rivière comme le bassin amortisseur de ce jet. Un saut de ski peut être décrit par quatre paramètres géométriques : la forme de la cuillère, sa position la plus basse, son rayon et son angle de sortie [III].

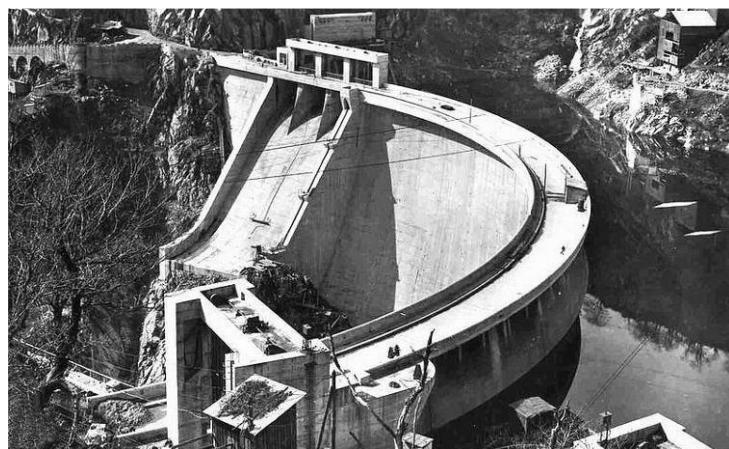


Figure 13 : Barrage et saut de ski de Marèges, Corrèze, France [10]

La forme de la cuillère est de préférence lisse (même si des cuillères en ligne brisée existent) et composée de courbes circulaire ou parabolique pour faciliter au mieux l'écoulement de l'eau. Bien que la parabole soit réputée pour ses écoulements réguliers, les cuillères circulaires sont plus généralement utilisées. Il est aussi possible de combiner ces deux formes dans une même cuillère [III].

La position inférieure de la cuillère est le plus souvent choisie en fonction du niveau du sol à l'endroit voulu afin d'éviter l'utilisation de grandes quantités de béton. Dans le cas où la cuillère est posée sur la centrale hydroélectrique, ce problème ne se pose pas [III].

Le rayon de la cuillère (R), dans le cas d'une forme circulaire, est déterminé pour que l'écoulement s'y produisant soit en contact permanent avec la cuillère et pour que celle-ci conduise au mieux le jet vers l'aval. En cas de mauvais dimensionnement, la pression de contact entre le jet et le saut de ski peut diminuer jusqu'à conduire à de la cavitation et à un endommagement de la cuillère. De nombreuses formules existent dans la littérature : elles lient le rayon à l'énergie de l'écoulement dans la cuillère [III].

L'angle de sortie du jet (par rapport à l'horizontale) est choisi en fonction de la vitesse de l'écoulement et de la différence d'altitude entre le saut et le lieu d'impact. S'ils sont à la même altitude, l'angle donnant le plus long jet est théoriquement¹ celui à 45° parce que sa forme est parabolique². Si le saut est plus élevé que le point d'impact, l'angle optimum diminue. Il est préférable de placer la sortie du jet à une hauteur de $0,1xR$ (pour les grandes chutes) à $0,125xR$ (pour les petites chutes) au dessus de la position la plus basse de la cuillère : cela conduit à un angle de sortie de 26° à 29° . Dans la pratique, la majorité des sauts de ski ont un angle de sortie compris entre 20° et 40° [III].

Lors du passage dans l'air du jet d'un saut de ski, celui-ci dissipe 12 % de son énergie [XI].

1.3.2 La fosse d'érosion

Je détaille en premier lieu quelques notions sur l'érosion et puis j'aborderai les fosses d'érosion.

1.3.2.1 Rappels sur l'érosion

L'érosion est définie comme une « action d'usure et de transformation que les eaux et les agents atmosphériques font subir à l'écorce terrestre » [VI]. Lors de l'érosion par l'eau, le transport des particules solides est décrit principalement par les phénomènes de charriage et de suspension [XII].

¹ L'angle réel de sortie est souvent inférieur à l'angle de la cuillère parce que le rayon de celle-ci peut être trop petit pour dévier complètement le jet [III].

² Il est possible de calculer la portée du jet à partir de la théorie de la balistique. Cette portée dépend de la vitesse du jet, de l'angle de sortie de la cuillère et de la différence de hauteur entre le saut et le lieu d'impact. La portée réelle est cependant plus faible que la portée théorique suite au frottement du jet dans l'air [III].

Le charriage consiste en un déplacement près du fond du cours d'eau des particules solides les plus grossières par de brefs sauts (la saltation) durant lesquels les particules entrent en suspension dans l'écoulement et avancent un petit peu avant de retomber sur le fond [XII]. C'est ce type d'érosion qui est observée dans le bac à graviers du modèle réduit.

La suspension est typique des écoulements turbulents dans lesquels les particules fines peuvent, en entrant en saltation, se retrouver à une hauteur où les forces turbulentes s'opposent au poids de la particule et la maintiennent en suspension [XII].

1.3.2.2 Approche physique

Nous étudions maintenant la dissipation de l'énergie du jet ainsi que la formation de la fosse d'érosion.

L'énergie du jet est dégradée par l'action de plusieurs facteurs : la résistance de l'air, l'entraînement d'air dans le jet, la diffusion du jet dans la fosse remplie d'eau, l'impact au fond de la fosse et le creusement de celle-ci. Lorsque le jet atteint le fond de la rivière, il va se produire un processus d'affouillement en trois phases [III] :

- le jet, en s'introduisant dans les fissures et les discontinuités des roches et grâce aux pressions dynamiques induites, va fracturer le fond de la rivière en blocs de tailles diverses ;
- il s'en suit un arrachage et une désintégration des blocs, ceux-ci sont alors transportés par l'eau en dehors de la zone fracturée ;
- enfin, leur déplacement fait apparaître une fosse combinée à un bourrelet de matériaux en aval (voir figure ci-après).

La fosse peut présenter différentes formes et ses pentes vont nous indiquer leur mode de creusement. Si la pente est égale à la pente d'équilibre du matériau, ce sera le signe que cette pente résulte d'un écroulement étant dû au jet qui a expulsé le matériau du fond, celui-ci se faisant ensuite emporter par le courant. Par contre, si la pente est inférieure à la pente d'équilibre, cela nous indique que c'est le jet qui a façonné cette pente.

Ce creusement va finir par s'arrêter à partir du moment où la matière n'arrive plus à remonter au-dessus du bourrelet (tout ce qui monte est contrebalancé par ce qui redescend dans la fosse).

Finalement, un équilibre est atteint et la fosse arrête de croître. Dans la réalité, ce phénomène consiste à creuser le lit de la rivière, sur une surface plus ou moins grande, et donc à l'endommager.

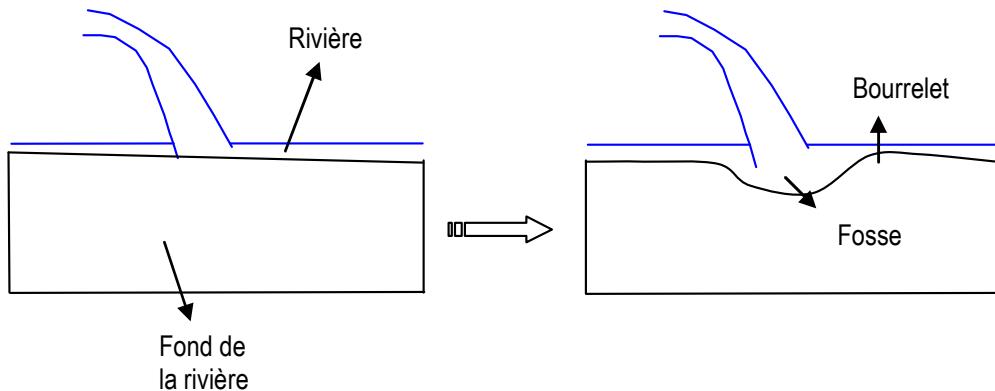


Figure 14 : Schéma du creusement d'une fosse d'érosion

Le creusement de la fosse peut présenter un réel danger pour la stabilité du barrage ou des ouvrages connexes parce que la fosse peut atteindre leurs fondations et les éroder comme le fond de la rivière. Même si le saut de ski est dimensionné pour envoyer assez loin le jet, la stabilité n'est pas nécessairement garantie parce que la fosse peut avoir tendance à se déplacer vers l'amont au cours du temps. Sur le terrain, on essaye de construire les systèmes de saut de ski là où des roches très résistantes sont disponibles ; cela ne suffit cependant pas à éviter des fosses trop grandes [III] : l'eau est une force érosive très puissante et vient à bout de n'importe quelle roche pour peu qu'on lui en laisse le temps. Une autre possibilité est de « pré-creuser » la fosse pour s'assurer de sa position [XII].

1.3.2.3 Approche théorique

Pour prévoir la profondeur d'une fosse, différentes méthodes sont possibles [III] :

- la combinaison des approches théoriques à des essais en laboratoire ou à des observations sur des évacuateurs existants ;
- l'élaboration de relations empiriques à partir de ces évacuateurs ;
- l'étude, en laboratoire, d'un modèle réduit pour chaque projet.

Les formules développées dépendent d'un nombre assez variable de paramètres selon les auteurs dont : le débit, la différence de hauteur entre le niveau de la retenue et celui de la cuillère, la géométrie de la cuillère, la profondeur d'eau à l'aval, les caractéristiques mécaniques des roches en présence (comme la taille des blocs, leur résistance en compression et l'état des joints rocheux)... L'emploi de formules complexes est toutefois limité par la détermination des paramètres des roches et,

de plus, des résultats similaires peuvent être obtenus par l'emploi de formules plus simples. Damle a établi la relation empirique suivante à partir de multiples observations sur des cas réels (cette relation est satisfaisante bien qu'elle ne soit pas dimensionnelle) :

$$d_s = A \cdot \sqrt{q \cdot h_0}$$

où

- d_s est la profondeur de la fosse sous le niveau de l'eau (m) ;
- A est un coefficient indiquant l'état de creusement de la fosse (de 0,36 pour la fosse minimale à 0,90 pour la fosse maximale) ;
- q est le débit spécifique (m^2/s) ;
- h_0 est la différence d'altitude entre le niveau du réservoir et celui du bout de la cuillère (m).

Le grand problème de ces relations, c'est qu'elles ne donnent qu'une information sur la profondeur de la fosse et pas sur des paramètres plus intéressants tels que le volume excavé, la superficie endommagée ou la forme de la fosse. Elles ne permettent pas non plus de prendre en compte de légers changements dans les paramètres de la cuillère tels que l'angle de sortie, la courbe choisie ou d'éventuelles indentations [III].

1.3.2.4 De l'utilité des modèles réduits

Au vu des dernières remarques, il est obligatoire, pour qui veut réaliser une étude sur différents sauts de ski, de tester les configurations sur des modèles réduits. S'il est aisément de reproduire des barrages et leurs composants, il est beaucoup moins facile d'obtenir un fond de rivière érodable en similitude avec la rivière réelle. La plupart des essais emploient dès lors des matériaux sans cohésion et représentent seulement la phase de creusement et d'expulsion de matériaux vers l'aval. Il est communément admis que les fosses obtenues avec ces matériaux représentent l'étape ultime de l'affouillement. Cependant, les fosses de laboratoire étant toujours plus grandes que dans la réalité, il n'est pas simple de faire un dimensionnement précis au laboratoire [III]. Par contre, ces essais sont tout à fait valables pour donner un ordre de grandeur pour les fosses et pour comparer différentes configurations de saut de ski afin de choisir la meilleure (selon des critères variables suivant le projet).

1.3.2.5 Moyens de remédiation de la fosse

Pour diminuer la taille des fosses, plusieurs solutions sont envisageables :

- soit obtenir un fond de rivière plus résistant ;
- soit créer un plan d'eau amortisseur ;

- soit diminuer l'énergie de l'écoulement avant qu'il n'atteigne la fosse [III].

Pour renforcer le lit de la rivière, il est possible de traiter les roches en remplissant les fissures avec du béton ; cette option est délicate puisqu'on ne sait pas très bien comment va se comporter du béton sous eau soumis à des pressions élevées et variables et qu'il est difficile de bien estimer la surface à traiter. Au lieu de colmater les brèches dans le bedrock, une énorme dalle de béton peut tout aussi bien être coulée sur le fond rocheux et constituer un socle amortisseur en dur. Dans ce cas, la fosse d'érosion disparaît mais le lit se trouve profondément modifié [III].

Créer un plan d'eau, via la construction d'un second barrage, où viendrait impacter le jet est une autre solution. Le jet perdrait son énergie au contact de l'eau et non plus au contact du fond de la rivière. Dans la pratique, cette option se révèle très coûteuse [III].

La dispersion de l'énergie avant l'impact est l'objet du paragraphe suivant.

1.3.3 Les indentations de sauts de ski

Pour diminuer l'énergie du jet, il est possible de placer des indentations au bout de l'évacuateur de crue (comme l'ellipse noire l'indique sur l'image ci-dessous). Celles-ci vont diviser l'écoulement en plusieurs jets dans différentes directions. La surface de contact entre l'eau et l'air, et donc les forces de frottement, sera dès lors plus élevée qu'avec un jet compact. Pareillement, la surface d'impact des jets sera plus grande et plus étalée ce qui donnera une meilleure diffusion dans l'eau de la fosse (il est plus facile de disperser l'énergie de multiples petits jets que celle d'un jet concentré). Nous voyons que l'emploi d'indentations a pour but de diviser spatialement le jet afin qu'il perde un maximum d'énergie par frottement dans l'air et l'eau.

Des indentations ont été testées sur le modèle réduit du barrage d'Itaipu au Brésil : elles ont permis de réduire la profondeur de la fosse. Cette réduction ne fut cependant pas assez importante pour que ces indentations soient employées parce qu'elles nécessitaient un design très élaboré et qu'il était compliqué d'éviter la cavitation [III].

Des indentations ont été construites sur le nouvel évacuateur de crue du barrage sur le Gosau en Autriche. Les études en laboratoire ont montré que ces indentations divisaient le jet longitudinalement et transversalement et que le point d'impact pour le débit de crue maximum se situait 20 m à l'aval de la sortie du saut de ski [X].



Figure 15 : Evacuateur de crue et indentations du barrage de Gosau, Oberösterreich, Autriche [X]

Chapitre 2 : Expérimentation

En partant du titre de mon travail de fin d'études « Effet des indentations des sauts de ski sur la fosse d'érosion en aval des évacuateurs de crue de barrage », je détaille l'ossature des essais effectués. Premièrement, je décrirai le modèle réduit employé (les formes de l'évacuateur et des indentations ainsi que les caractéristiques de la fosse d'érosion). Deuxièmement, je présenterai les différents cas testés et je discuterai de leur réalisation d'un point de vue technique et financier. Troisièmement, je listerai les techniques pour étudier les effets des indentations sur la fosse et puis les moyens pour expliquer ces effets. Quatrièmement, je détaillerai le protocole expérimental. Enfin, j'aborderai la partie la plus intéressante du travail : l'analyse des résultats.

2.1 Modèle réduit

Cette partie présente le modèle actuel ainsi que les améliorations apportées par rapport à l'ancien. La géométrie des indentations sera ensuite clairement définie. Finalement, une brève explication sur le fonctionnement des pompes et le débit autorisé sera fournie.

2.1.1 Ancien modèle

La maquette sur laquelle j'ai travaillé est en fait le modèle réduit au 1/70e de l'évacuateur de crue du barrage de Kalivaç en Albanie. Ce modèle comportait quatre passes vannées, placées sur un arc de cercle, envoyant l'eau dans un évacuateur de crue en forme de « canal rectiligne brisé » terminé par des indentations de géométries diverses. Le canal déversait ensuite son eau dans un bac rempli de graviers où une fosse était creusée par l'écoulement. Ce modèle était aussi doté d'un déversoir latéral à seuil libre, le vrai évacuateur de crue, placé en rive gauche de la retenue avant les vannes et alimentant le même canal que les vannes.

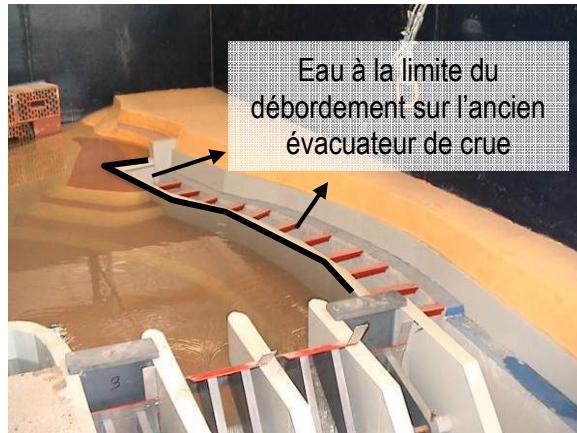


Figure 16 : Evacuateur de crue de l'ancien modèle, $Q = 60 \text{ l/s}$

2.1.2 Modèle utilisé

Le modèle de Kalivaç n'a pas pu être réutilisé à l'identique à cause du manque de symétrie dans l'écoulement après les vannes. J'ai condamné les deux passes extérieures et reconstruit des nouvelles parois sur le fond du précédent canal pour obtenir un évacuateur parfaitement rectiligne. Ce nouveau canal fait 38,4 cm de large, 2,52 m de long, ses parois sont verticales d'une hauteur de 20 cm et il a une pente de 8,6% ; l'eau à sa sortie est à 60 cm du fond du bac à graviers. Ce bac à graviers n'a pas été modifié, sa forme est trapézoïdale (voir dimensions à la Figure 20) et il contient des granulats 14/20. Ceux-ci ont une masse volumique de 2400 kg/m^3 , une masse volumique apparente de 1800 kg/m^3 et une pente d'équilibre³ d'à peu près 38° (soit 78%). Le bac est rempli jusqu'au seuil aval qui est à une hauteur de 53,5 cm par rapport à la dalle de béton.

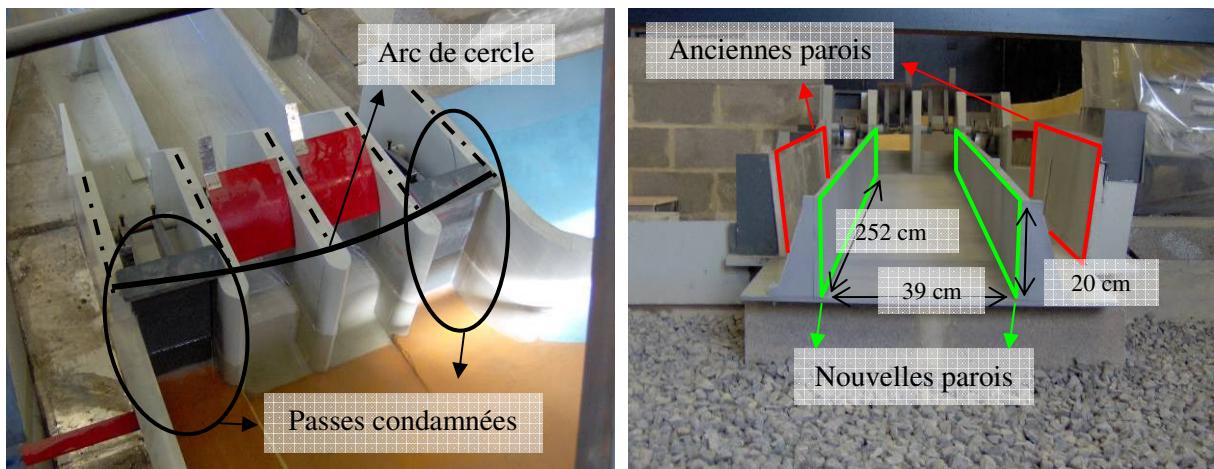


Figure 17 : Modifications de l'ancien modèle

³ La notion de pente d'équilibre est issue du concept d'angle de frottement interne qui est un des deux paramètres servant à représenter la courbe intrinsèque de Mohr. Cette courbe définit le critère de rupture de Coulomb qui va permettre de calculer le comportement à la rupture des sols. Pour des graviers, les valeurs habituelles d'angle de frottement sont comprises entre 36° et 42° pour la résistance maximale et entre 32° et 36° pour la résistance résiduelle [V].



Figure 18 : Indentations en bout de canal



Figure 19 : Canal et bac à graviers

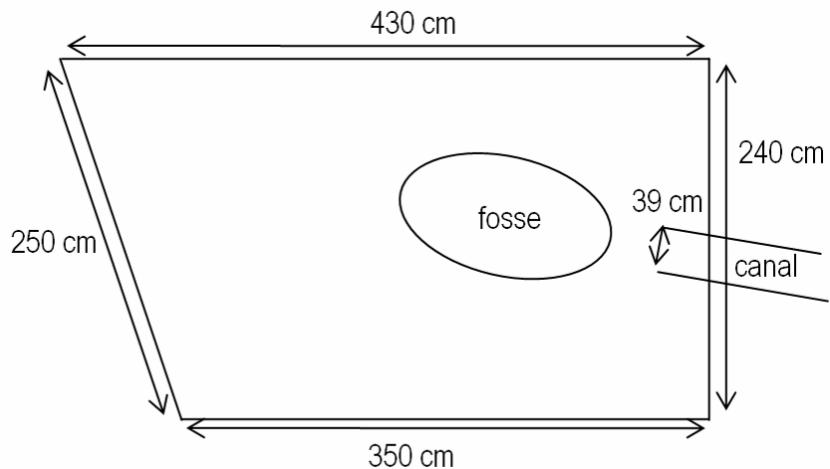


Figure 20 : Schéma du bassin de dissipation

Grâce à ces changements, j'obtiens un évacuateur de crue symétrique selon un axe longitudinal passant entre les deux vannes. Cette symétrie me permettra d'obtenir des résultats plus généraux qui pourront être transposés à d'autres cas.

2.1.3 Forme des indentations

Au bout de mon canal, je place des indentations dont les différentes dispositions seront expliquées en 2.2. J'ai choisi de leur donner une forme parabolique avec un angle de sortie de 27° par rapport à l'horizontale, une hauteur de 12,5 cm, une longueur de 30 cm et une largeur de 7,5 cm (à peu près le cinquième de la largeur). Ces dents sont fixées au moyen de vis et un raccord en silicone est placé en amont pour que la transition entre le canal et les dents soit la plus douce pour ne pas trop

perturber l'écoulement. Dans le cas de dents contre les parois latérales ou collées les unes contre les autres, un joint de silicone est aussi utilisé pour éviter toute fuite latérale.

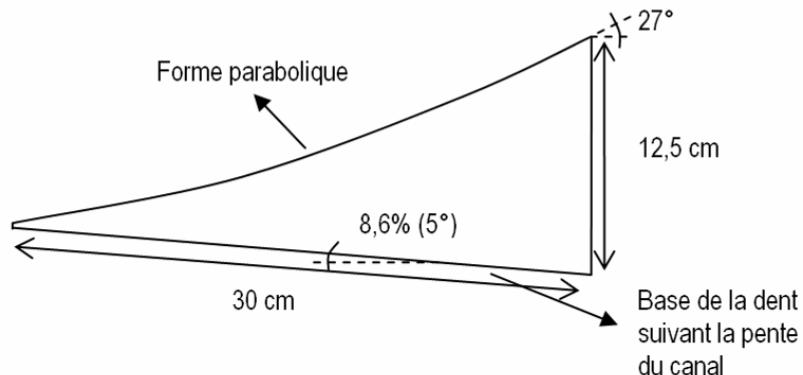


Figure 21 : Forme des indentations

2.1.4 Débit

Le laboratoire des constructions d'hydrauliques dispose de deux pompes permettant de faire passer un débit maximal d'environ 400 l/s. A l'opposé, le débit minimal est d'à peu près 15 l/s (il est possible d'aller plus bas mais la précision du débitmètre diminue fortement). Pour mes essais, je suis en fait limité par la configuration du modèle réduit : au-delà d'un débit de 60 l/s, une partie de l'eau se déverse dans l'évacuateur de crue latéral (voir Figure 16) et puis à gauche du nouveau canal, ce qui rompt la symétrie de l'écoulement à l'entrée dans la fosse.

La régulation du débit peut se faire via une action sur la vanne ou sur la vitesse de la pompe⁴ [II]. Dans le premier cas, on parle de régulation par étranglement : elle consiste à faire varier les pertes de charge dans la conduite, en jouant sur l'ouverture de la vanne, tout en gardant la vitesse de rotation de la pompe constante. Cette méthode n'est pas très rentable puisqu'elle consiste à détruire de l'énergie par les pertes de charge.

Dans le second cas, on parle de régulation à vitesse variable : elle consiste à faire varier la vitesse de rotation de la pompe, grâce à « un moteur électrique asynchrone alimenté via un variateur de fréquences » (Léonard, 2008), tout en laissant la vanne grande ouverte afin de minimiser les pertes de

⁴ Le débit à la sortie de la conduite est donné par l'intersection de la courbe caractéristique de la pompe et de la courbe caractéristique de l'installation. La courbe de la pompe lie la hauteur manométrique H_t au débit Q et à la vitesse de rotation ω de la pompe ($H_t = f(Q, \omega)$) tandis que la courbe du circuit lie H_t à la hauteur hydraulique de l'installation (elle représente la différence d'énergie entre l'entrée et la sortie de l'eau du circuit) et aux pertes de charge dans les canalisations via le débit Q ($H_t = f(Q, H_{hyd})$).

charge. Cette méthode a un meilleur rendement que la précédente parce qu'elle fait varier l'énergie donnée au fluide dans la pompe en fonction du débit recherché.

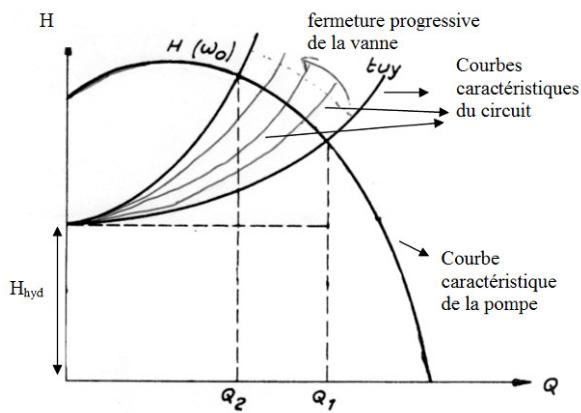


Figure 22 : Régulation par étranglement [II]

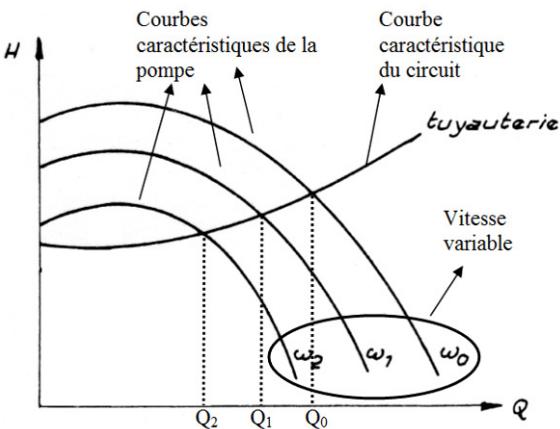
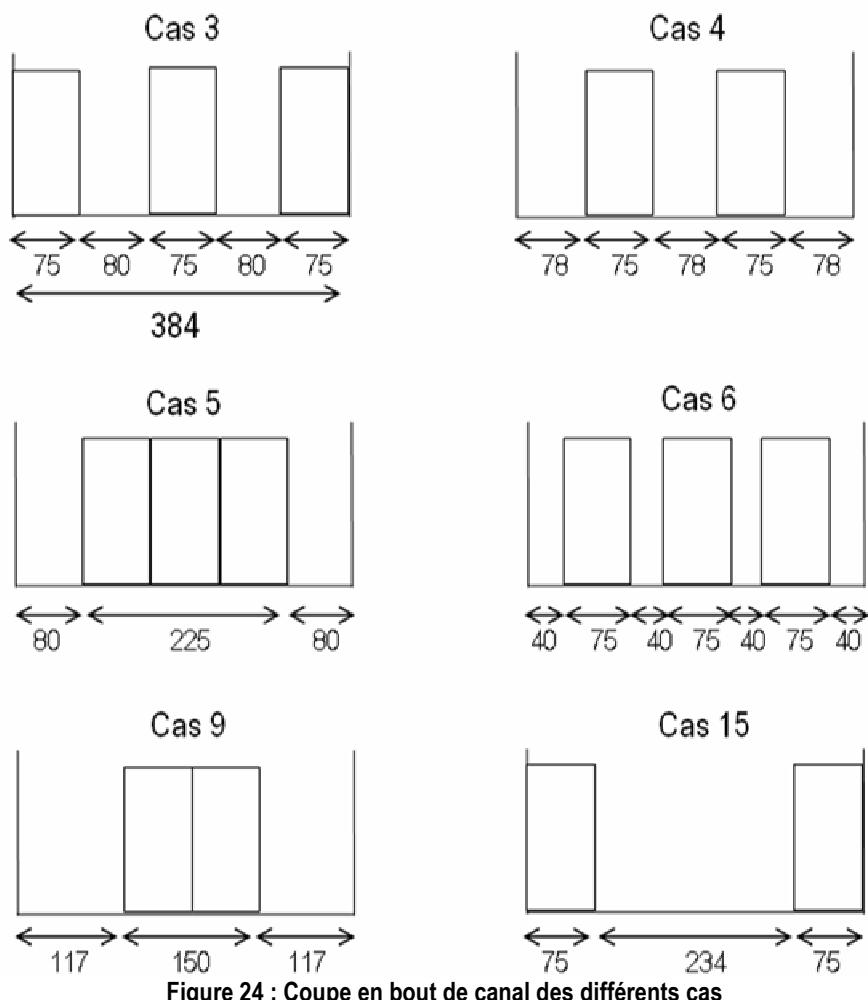


Figure 23 : Régulation à vitesse variable [II]

Au laboratoire, la vitesse minimale de rotation des pompes est de 25 tours par seconde. Dans le cas de mon modèle, la vanne est ouverte au maximum et la vitesse est augmentée pour les débits supérieurs à 50 l/s tandis que l'on joue sur la fermeture de la vanne pour les débits inférieurs.

2.2 Cas étudiés

Je vais tester différentes géométries à placer à l'extrême de l'évacuateur de crue. D'abord, je testerai l'évacuateur sans indentations (cas 1). Ensuite, je placerai un saut de ski de la même forme que les dents sur toute la largeur disponible (cas 2). Par après, je testerai des situations intermédiaires avec un nombre variable de dents (pour rappel, celles-ci font 7,5 cm de large et sont toujours placées symétriquement par rapport au centre) : ce sont les cas 3, 4, 5, 6, 9 et 15. La figure suivante représente une coupe faite en bout de canal (distances en mm) :



Suite aux résultats obtenus avec ces cas (voir le pourquoi de ces nouveaux cas en 2.5), j'ai choisi d'approfondir ma recherche sur les cas 2 et 5. Ces deux cas seront testés avec des débits de 20 l/s et 40 l/s :

Cas n°	Forme du cas n°	Débit (l/s)
11	2	20
12	2	40
13	5	20
14	5	40

Tableau 1 : Cas avec débit variable

La position des indentations du cas 5 sera aussi modifiée et fera l'objet de deux nouveaux cas.

Pour le cas 7, l'indentation du milieu sera placée en retrait de 10 cm par rapport aux autres selon l'axe du déversoir.

Pour le cas 8, la situation est inversée avec les indentations extérieures qui reculent de 10 cm.

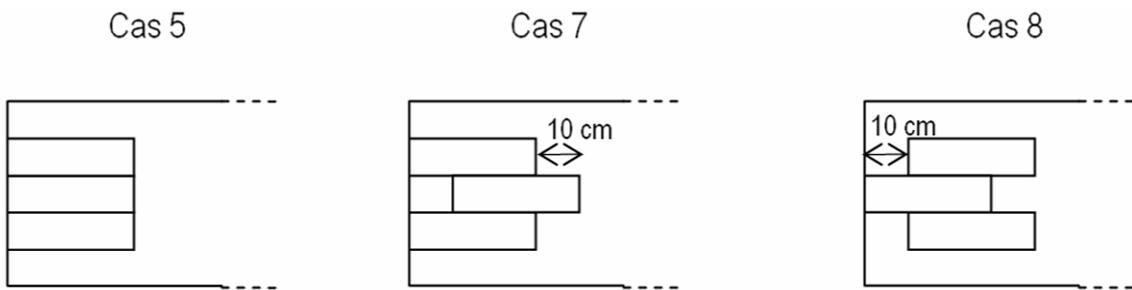


Figure 25 : Variations géométriques du cas 5

Le cas 10 sera le même que le cas 3 et nous permettra d'estimer la reproductibilité des essais (voir 2.5.1).

2.2.1 Comparaison des cas selon les coûts des matériaux

Dans la pratique, ces différentes possibilités ne conduisent pas au même bilan financier. Nous pouvons calculer rapidement le volume de matériaux et les coffrages requis pour chaque cas :

	Volume de matériaux (%)	Coffrages verticaux de côté	Coffrages verticaux de front
Cas 1	0	0	0
Cas 2	100	2	5
Cas 3	60	6	3
Cas 4	40	4	2
Cas 5	60	2	3
Cas 6	60	6	3
Cas 7	60	6	3
Cas 8	60	6	3
Cas 9	40	4	2
Cas 15	40	2	2

Tableau 2 : Estimation du coût des différents cas

La solution la moins coûteuse est évidemment celle où l'on ne place aucune indentation. Pour les autres cas, l'analyse est assez difficile puisqu'elle dépend des coûts du béton (variable suivant la proximité des carrières et des cimenteries) et des coffrages en acier (variable selon la présence ou non d'industries sidérurgiques dans la région). Enfin le coût de la main d'œuvre n'est pas à négliger, ce facteur peut devenir déterminant selon le pays concerné : dans un pays à faible salaire, il peut être intéressant de construire des formes compliquées nécessitant beaucoup de main d'œuvre tandis qu'une solution plus simple avec plus de matériaux sera peut-être préférée dans un pays à fort coût de main d'œuvre. Si la solution optimale se révèle trop chère, il est toujours possible de faire un compromis entre les coûts de construction et la préservation de la fosse. Cependant un tel compromis semble de plus en plus bancal au vu de l'évolution actuelle de la cause du développement durable et de la prise en compte grandissante des coûts liés à l'environnement (via un coût global regroupant toutes les étapes de la vie du projet et leurs influences sur l'environnement). J'espère que cet élan environnemental perdure et qu'à l'avenir il coûte moins cher de préserver la nature plutôt que de l'abîmer !

2.2.2 Comparaison des cas selon la technique

L'aspect constructif est un autre paramètre important qui nous permettra de privilégier ou d'écartier certaines solutions. J'analyse le mode de coulage du béton (d'un seul tenant ou pas) et la mise en place des coffrages (du point de vue de l'espace pour les placer et de leur enchevêtrement).

	Coulage du béton	Espace pour les coffrages (en largeur de dent)	Enchevêtrement des coffrages	Complexité
Cas 1	sans objet	sans objet	sans objet	sans objet
Cas 2	monobloc	0	faible	moyenne
Cas 3	multi-blocs	2	moyen	moyenne
Cas 4	multi-blocs	3	moyen	moyenne
Cas 5	monobloc	2	faible	faible
Cas 6	multi-blocs	2	élevé	élevée
Cas 7	multi-blocs	2	moyen +	élevée
Cas 8	multi-blocs	2	moyen +	élevée
Cas 9	monobloc	3	faible	faible
Cas 15	multi-blocs	3	faible	moyenne

Tableau 3 : Estimation de la complexité des différents cas

Nous pouvons affirmer sans trop de risque de se tromper que le plus simple est de couler un seul gros bloc avec beaucoup d'espace pour les coffrages et le moins d'étais possible. Au vu de cela, les cas 5 et 9 semblent être les moins compliqués techniquement. A l'opposé, nous trouvons le cas 6 qui présente trois blocs séparés par des petits écarts. Les cas 7 et 8 sont à part parce qu'ils nécessitent des dents décalées qui ne peuvent être coulées en même temps (il faut attendre que l'indentation

centrale durcissee pour coiffer les deux autres). Tous les autres cas obtiennent des complexités semblables et se situent entre les deux extrêmes. La complexité géométrique peut aussi s'évaluer en termes économiques et pourrait donc être intégrée au bilan financier global du projet.

2.3 Paramètres étudiés

L'analyse des différentes formes de l'évacuateur de crue sera menée grâce à une étude précise de la fosse d'érosion ultime, que ce soit au niveau de sa forme, de sa taille, de sa profondeur, de sa position, etc... Je chercherai ensuite à expliquer pourquoi j'obtiens des fosses différentes selon les cas. Je tenterai et combinerai, si possible, quatre approches :

- l'étude de la dégradation d'énergie entre le bas de l'évacuateur de crue et le seuil à l'aval de la fosse ;
- l'étude de la répartition du débit entre les indentations ;
- l'étude des jets entre la sortie de l'évacuateur de crue et leur impact dans le bac à graviers rempli d'eau ;
- l'étude de la pression sous les jets dans un bac vidé de ses graviers.

N.B. : les fiches techniques de tous les instruments employés, lorsqu'elles sont disponibles, sont placées dans les annexes.

2.3.1 La fosse d'érosion

La fosse d'érosion ultime sous-entend que le phénomène de creusement a atteint l'équilibre. Pour obtenir une telle fosse, je dois faire des essais pendant un temps certain. Pour diminuer leur durée, j'arase le bourrelet de graviers se formant à l'aval de la fosse au cours de l'essai : cela facilite le creusement de la fosse puisque les graviers ont moins de mal à en sortir. J'aborde d'abord l'instrument permettant d'étudier la fosse d'érosion et puis je détaillerai tous les paramètres déduits des mesures.

2.3.1.1 Télémètre laser

2.3.1.1.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement

Le télémètre laser utilisé est un PD25 de la firme *Hilti*. Sa plage de mesure va de 0,3 m à plus de 100 m.

Le manuel de l'appareil nous indique une précision de mesure de ± 3 mm pour des mesures individuelles prises dans un environnement à 23°C.

Pour de grandes distances à l'extérieur ou pour des températures comprises entre 0°C et 50°C, la précision n'est que de ± 5 mm suite aux influences atmosphériques.

Quand il gèle (entre 0°C et -10°C), la précision tombe à ± 7 mm.

Ce laser peut fonctionner en mode manuel ou être contrôlé par ordinateur. Les mesures peuvent être prises une à une ou bien en mode « tracking », c'est-à-dire en continu. Dans le cadre de ce travail, j'effectuerai des mesures ponctuelles pilotées par ordinateur. Selon une étude statistique de N. Brasseur [1], la précision des mesures atteint 3 mm dans l'environnement intérieur du laboratoire d'hydrodynamique appliquée et des constructions hydrauliques de l'ULg, cela confirme bien les informations données par le fabricant. Cette précision me servira à donner des intervalles de validité pour les grandeurs de la fosse.



Figure 26 : Télémètre laser PD25

Le principe de l'appareil simple : il se base sur la propagation d'un rayon laser. L'appareil émet donc un faisceau laser dont la longueur d'onde est comprise entre 620 et 690 nm, ce faisceau est ensuite partiellement réfléchi par la surface qu'il rencontre et est renvoyé vers l'appareil où un récepteur de lumière va détecter le rayon réfléchi. Le télémètre calcule ensuite le temps entre l'émission et la réception du rayon et, en connaissant la vitesse de propagation de la lumière, détermine la distance entre le laser et l'objet rencontré [2]. Dans la pratique, ce sont bien sûr les surfaces les plus réfléchissantes (c'est-à-dire les plus claires) qui donneront les meilleurs résultats. Après chaque coulée au laboratoire, il faut donc attendre un certain temps pour que les graviers sèchent et passent du gris foncé au gris clair avant d'effectuer les mesures.

2.3.1.1.2 Support

Le télémètre est fixé à un chariot se déplaçant à l'intérieur d'un cadre posé au-dessus du bac à graviers du modèle. Ce cadre fait 4,6 m sur 3,4 m et a été ajusté sur les bords du modèle pour être parfaitement horizontal et que ses grands côtés soient parallèles aux murs latéraux de la fosse. Le chariot se déplace sur un montant de la longueur du petit axe du cadre (barre verte sur la figure ci-

dessous) tandis que ce montant se déplace selon le grand axe ; tous ces déplacements se font à l'aide de deux moteurs contrôlés par un ordinateur (un pour le déplacement sur le petit axe et un autre pour le grand axe). La zone maximale de mesure fait au final 3,9 m sur 2,4 m. Un câble est placé entre le télémètre et l'ordinateur afin de transmettre les instructions de celui-ci (allumer le faisceau, prendre une mesure) et de rapatrier les données (sous la forme d'un tableau à trois colonnes : deux pour les coordonnées x , y et une pour la mesure de distance). Si le laser n'arrive pas à trouver une valeur en un point après 15 secondes, l'ordinateur est configuré pour renvoyer la valeur absurde de -999 mm. Le logiciel contrôlant le cadre et le télémètre permet de faire des mesures point par point ou bien de parcourir une zone rectangulaire et de prendre des mesures à chaque pas $\Delta x = \Delta y$ voulu. Il est aussi possible de faire revenir le chariot jusqu'au grand axe après chaque aller-retour selon le petit axe pour être sûr que les distances soient bien mesurées aux endroits voulus par l'ordinateur (le moteur peut avoir des défaillances et faire s'arrêter le chariot au mauvais endroit). Cette sécurité n'est cependant pas disponible pour la progression sur le grand axe.

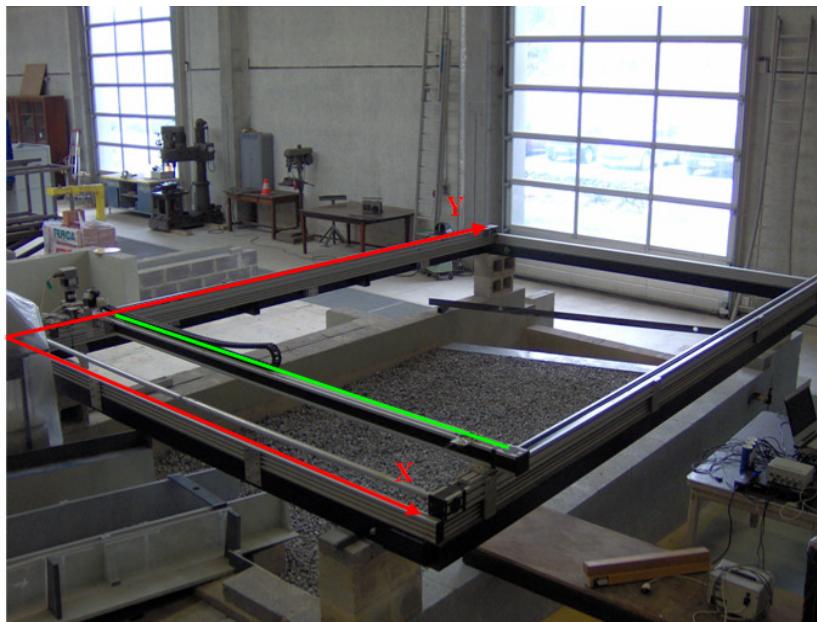


Figure 27 : Cadre de mesures laser

2.3.1.2 Caractéristiques observées

Pour décrire les paramètres de la fosse, j'utilise les données obtenues grâce au cadre de mesure laser. Pour chaque cas, j'enregistre la topographie du bac à graviers avant et après l'essai sur une zone rectangulaire de coordonnées $x = 0$ à 219 cm et $y = 0$ à 369 cm avec un pas de 3 cm. Ce pas de 3 cm est un bon compromis entre des résultats précis et un temps de mesure raisonnable : 9000 points sont obtenus par balayage en à peine 1h45. Les résultats obtenus sont d'abord disposés dans une matrice rectangulaire afin de permettre une représentation graphique aisée sous la forme d'un

rectangle dont les axes sont les x et les y et où la couleur est fonction de la distance. Je remplace ensuite les valeurs erronées venant du laser par la moyenne des valeurs contiguës. Pour déterminer la fosse d'érosion produite lors de l'essai, je soustrais les résultats d'après l'essai à ceux d'avant, puis je donne une échelle de couleur spéciale à la figure résultante (avec les valeurs en mm) et je trace des courbes de niveau à partir de 25 mm du fond et puis tous les 75 mm ainsi que la courbe de différence nulle.

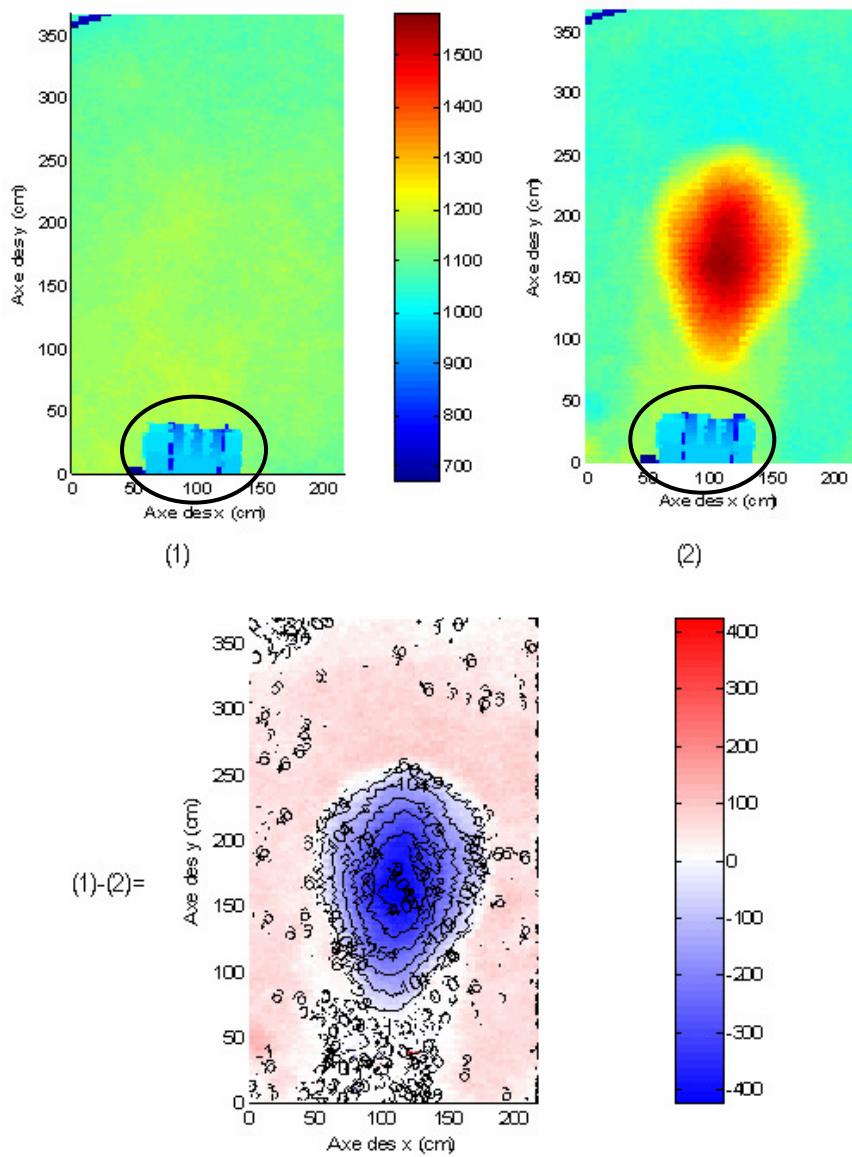


Figure 28 : Principe de calcul de la fosse d'érosion (cas 3)

Sur la figure ci-dessus, nous avons les mesures laser avant (1) et après (2) et puis la différence entre les deux. Le pas choisi nous permet même de distinguer les parois du canal, le nombre et la position des indentations (ellipses noires). En ne gardant que la courbe de niveau à différence nulle et celle à 10 mm au-dessus du fond de la fosse, la représentation graphique de cette différence (voir

Figure 29) permet déjà d'obtenir quelques paramètres intéressants (les paramètres numériques sont mesurés graphiquement avec une précision de 2,5 cm) :

- les longueur et largeur maximales de la fosse, soit L et l
- les distances entre le point le plus profond et les bords de la fosse selon les mêmes inclinaisons que L et l , soit L_1 , L_2 , l_1 et l_2
- une appréciation de la forme de la fosse (ovale, ronde, rectangulaire, double-ovale...) grâce à la forme des différentes courbes de niveau (ovale dans l'exemple ci-dessus)

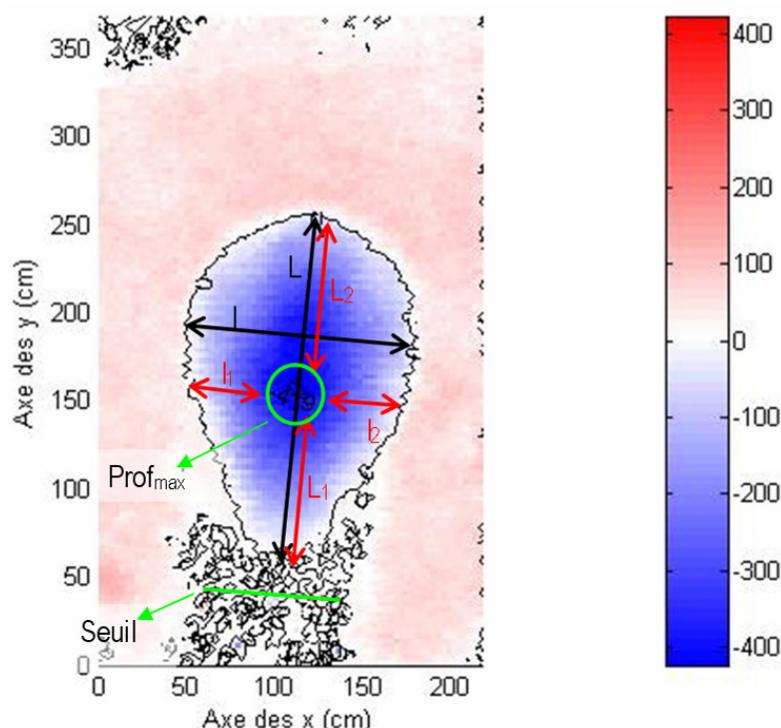


Figure 29 : Paramètres de base de la fosse (cas 3)

La distance intacte entre le bord du canal et le début de la fosse est mesurée graphiquement avec une précision de 2,5 cm sur une figure donnant la topographie après l'essai⁵ et où on représente le niveau moyen de départ du bac à graviers, c'est-à-dire la courbe de niveau 1175 mm. Cette distance est appelée D_{intact} .

⁵ La mesure de ce paramètre n'a pas été réalisée sur la figure représentant la différence entre l'avant et l'après essai parce qu'il était difficile de choisir la courbe de niveau « zéro » à prendre entre la fosse et le seuil. En effet, sur la figure ci-dessus, nous voyons que les courbes de niveau sont fort perturbées entre le seuil et le début de la fosse. Ceci est dû à la façon dont la fosse est remblayée parce que son calcul se base sur la différence entre la fosse initiale et la finale et que le ratissage de départ peut donner un bac légèrement bombé près du seuil et qui serait érodé quoi qu'il se passe, cela conduit à une grande sensibilité du niveau « zéro ».

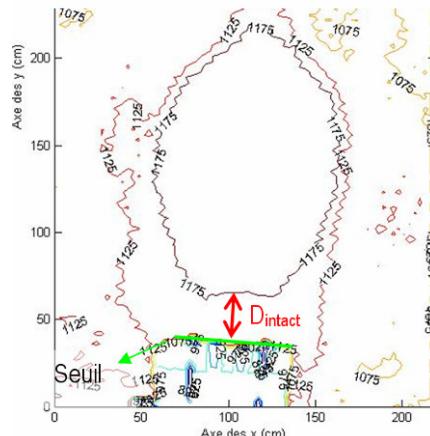


Figure 30 : D_{intact} (cas 4)

En traitant les données du laser, je calcule d'autres grandeurs importantes :

- le volume de la fosse d'érosion, V , qui est calculé en réalisant un balayage d'une zone rectangulaire (x_i à x_f et y_i à y_f) autour de la fosse (afin de ne mesurer que des creux dus aux jets). Lors du balayage de cette zone, je regarde la valeur de chaque point de la matrice résultante. Si cette valeur est négative, c'est-à-dire que le point mesuré est descendu lors de l'essai et donc qu'il y a eu creusement, je lui fais correspondre le volume d'un parallélépipède à base carrée de 3 cm de côté dont la hauteur est égale à la valeur négative⁶. Pour obtenir le volume total excavé, il suffit d'additionner tous ces volumes élémentaires.
- la surface de la fosse d'érosion, S , qui est donnée par le produit du nombre de valeurs négatives lors du balayage de la zone rectangulaire et de la surface élémentaire de 9 cm² donnée à chaque valeur (égale à l'aire du carré de 3 cm de côté).
- la valeur de distance la plus négative qui est prise dans la zone rectangulaire, elle représente la profondeur maximale relative de la fosse, soit p_{rel}
- la profondeur maximale absolue de la fosse, elle nous permet par après de vérifier si la dalle en béton a été atteinte ou pas (pour rappel, le cadre est parfaitement horizontal), soit p_{abs}
- la distance entre le point le plus profond de la fosse et le bord de l'évacuateur de crue, soit D_{max} , est calculée analytiquement. Je cherche l'équation de la droite passant par le

⁶ Pour être rigoureux, je devrai calculer le volume excavé non pas en construisant ces parallélépipèdes sur un seul point mais bien sur quatre points. Ce mode de calcul est cependant bien plus compliqué puisqu'il renvoie à des parallélépipèdes aux bases irrégulières. Le calcul du volume point par point a donc été privilégié pour sa simplicité et parce que le maillage était très fin.

bord du canal (ligne verte à gauche sur figure suivante) et puis, en connaissant les coordonnées du fond de la fosse, j'obtiens la distance⁷.

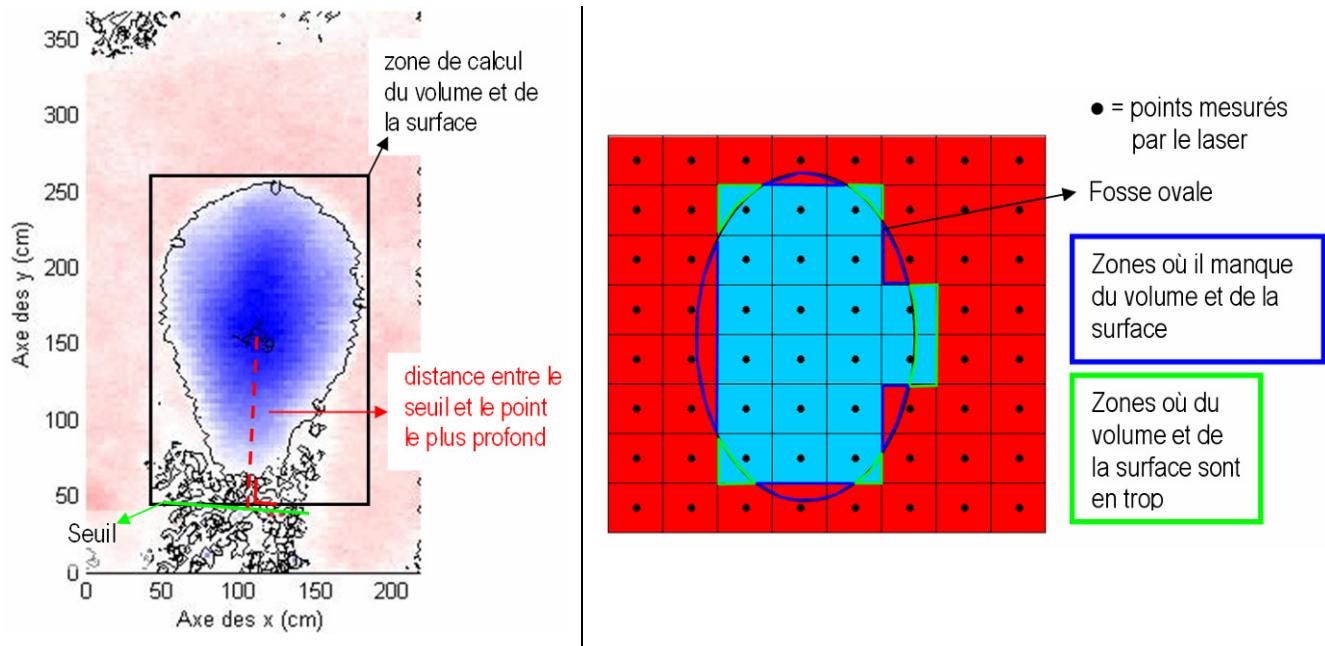


Figure 31 : Explications sur les paramètres calculés de la fosse

Le volume et la surface, ainsi calculés, diffèrent légèrement des valeurs réelles. En effet, ces deux paramètres ne sont pas exacts à 100 % sur le contour, puisque le long de cette ligne, j'utilise des petits carrés qui ne peuvent suivre la courbe de la fosse (voir la figure de droite ci-dessus où les carrés bleus sont ceux donnant un creusement parce que les points centraux sont dans la fosse ovale). Au niveau des profondeurs calculées, p_{rel} et p_{max} proviennent normalement du même point si le bac à graviers est bien ratissé avant l'essai.

Grâce à ces paramètres, je calcule le rapport de la longueur sur la largeur de la fosse ($= L/l$) qui permet de quantifier la forme de cette fosse. J'obtiens aussi les pentes des quatre côtés de la fosse en divisant la profondeur maximale relative par les valeurs L_1 , L_2 , l_1 , et l_2 , il vient respectivement

$$\alpha_1 = \frac{p_{rel}}{L_1}; \alpha_2 = \frac{p_{rel}}{L_2}; \beta_1 = \frac{p_{rel}}{l_1}; \beta_2 = \frac{p_{rel}}{l_2}.$$

Ces pentes serviront à déterminer le type d'érosion se produisant pour chaque cas.

⁷ La distance entre la droite d'équation $a.x + b.y + c = 0$ et un point $m(x_m; y_m)$ vaut $\frac{|a.x_m + b.y_m + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$

Ces paramètres, obtenus à partir des mesures laser, dépendent de la précision de l'appareil (3 mm). Si en un point, le laser mesure une distance de x mm, je suis sûr à 100% que la distance réelle est comprise entre $(x - 3)$ mm et $(x + 3)$ mm. En faisant l'hypothèse que toutes les mesures laser valent en fait un de ces deux extrêmes, je donne la plus large fourchette de validité de ces résultats :

- la profondeur maximale absolue sera comprise dans un intervalle de 6 mm autour d'elle
- la profondeur maximale relative sera comprise dans un intervalle de 12 mm autour d'elle, celle-ci résulte en effet d'une différence entre deux mesures laser x et x_1 . Dans le pire des cas ses points valent $(x-3)$ et (x_1+3) ou $(x + 3)$ et $(x_1 - 3)$, $(x - x_1)$ vaut dès lors soit $(x - x_1 - 6)$ mm ou $(x - x_1 + 6)$ mm.
- le cas de la surface (S) est plus difficile à traiter puisque la valeur calculée n'est déjà pas exacte (voir Figure 31). Les erreurs sur les mesures laser pourraient amener à retirer ou ajouter une bande d'une certaine largeur sur tout le périmètre de la fosse, les dimensions de cette bande dépendraient des pentes de la fosse sur tout le pourtour qui ne sont pas des données faciles à obtenir. Comme il n'est pas évident de calculer cette bande, je ne fixe pas d'intervalles pour la surface.
- le cas du volume est par contre abordé. Je fais l'hypothèse que la surface ne change pas mais bien les distances laser. Vu ce qui a été établi ci-dessus, le volume V (m^3) est compris dans le pire cas entre $(V + S.0,006)$ m^3 et $(V - S.0,006)$ m^3 . L'intervalle diminue donc avec la surface et devient nul lorsque qu'il n'y a plus de fosse.
- la distance entre p_{rel} et l'évacuateur de crue est constante puisque je postule que la place de p_{rel} ne change pas
- aucun intervalle n'est donné pour les autres paramètres (L, I, L_1, L_2, I_1, I_2) parce que, comme la surface, ils dépendent du périmètre de la fosse.

Au-delà de la précision du laser, les paramètres ci-dessus peuvent être influencés par le point d'impact du laser. En effet, si je définis la frontière du volume comme une courbe passant par le sommet des graviers, il se peut que le laser passe entre deux cailloux et mesure une distance trop grande. Je suppose que la plus grande erreur est égale à la granulométrie maximale des graviers, soit 20 mm, et qu'elle ne peut se faire que dans un sens (le rayon tombe soit sur les cailloux, soit entre ceux-ci sur la couche suivante, la valeur est donc exacte ou trop grande de 20 mm). Je définis d'autres intervalles :

- la profondeur maximale absolue réelle sera comprise entre p_{abs} mm et $(p_{abs} - 20)$ mm ;

- la profondeur maximale relative réelle sera comprise entre $(p_{\text{rel}} - 20)$ mm et $(p_{\text{rel}} + 20)$ mm ;
- le volume est compris entre V et $(V - S.0,020)$ m^3 ;

Les intervalles présentés ci-dessus paraissent élevés, surtout ceux en rapport avec le calcul du volume. S'il est raisonnable d'avoir de temps en temps à cause des graviers une erreur de 20 mm sur la distance mesurée au laser, il est fortement improbable que cette erreur se répète pour tous les points et conduise à de tels intervalles pour le volume. La valeur $(V - S.0,020)$ est donc extrême et a très peu de chance d'être atteinte. Je ne me baserai donc pas sur cet intervalle pour donner une fourchette au volume mais bien sur celui lié à la précision du laser soit V compris entre $(V + S.0,006)$ m^3 et $(V - S.0,006)$ m^3 .

2.3.2 Dissipation d'énergie au sein du modèle

J'aborde d'abord le principe du calcul de l'énergie d'un écoulement, puis j'expliquerai les instruments employés pour déduire cette énergie et ensuite le traitement des données.

2.3.2.1 *Energie de l'écoulement et théorème de Bernoulli*

L'énergie au sein d'un fluide est la somme des énergies cinétique, de pression et potentielle. Elle est calculée, sous la forme d'une hauteur d'eau, pour toute abscisse x de l'écoulement selon la relation suivante :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{\text{cinétique}} + E_{\text{de pression}} + E_{\text{potentielle}} \\ &= \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_x \end{aligned}$$

où v est la vitesse moyenne de l'écoulement, p la pression au sein du fluide et z l'altitude par rapport à un axe horizontal de base de la particule de fluide considérée.

En faisant l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions⁸ et en considérant une particule au niveau $z = z_f$ = altitude du fond de la section d'écoulement, il vient $p = \rho \cdot g \cdot h$ où h est la hauteur d'eau totale. Il vient dès lors :

⁸ La répartition hydrostatique signifie que la pression en un point d'un fluide est uniquement due au poids de la colonne d'eau située au-dessus ce point. Le poids de cette colonne d'eau est fonction de la masse volumique du fluide (ρ) de la gravité ou accélération de la pesanteur (g) et de la hauteur de cette colonne (h). Le profil des pressions évolue donc linéairement à partir d'une valeur nulle à la surface de l'écoulement selon l'équation $p = \rho \cdot g \cdot h$

$$E_x = \left(\frac{v^2}{2g} + h + z \right)_x$$

En faisant une coupe longitudinale de l'amont vers l'aval sur le modèle réduit (voir figure ci-dessous), nous voyons que le niveau de fond n'est pas le même dans le déversoir et sur le seuil aval. Je calcule l'énergie totale dans les sections A (juste avant les indentations) et B (seuil aval), il vient :

$$E_A = \frac{v_A^2}{2g} + h_A + z_A$$

$$E_B = \frac{v_B^2}{2g} + h_B + z_B = \frac{v_B^2}{2g} + h_B$$

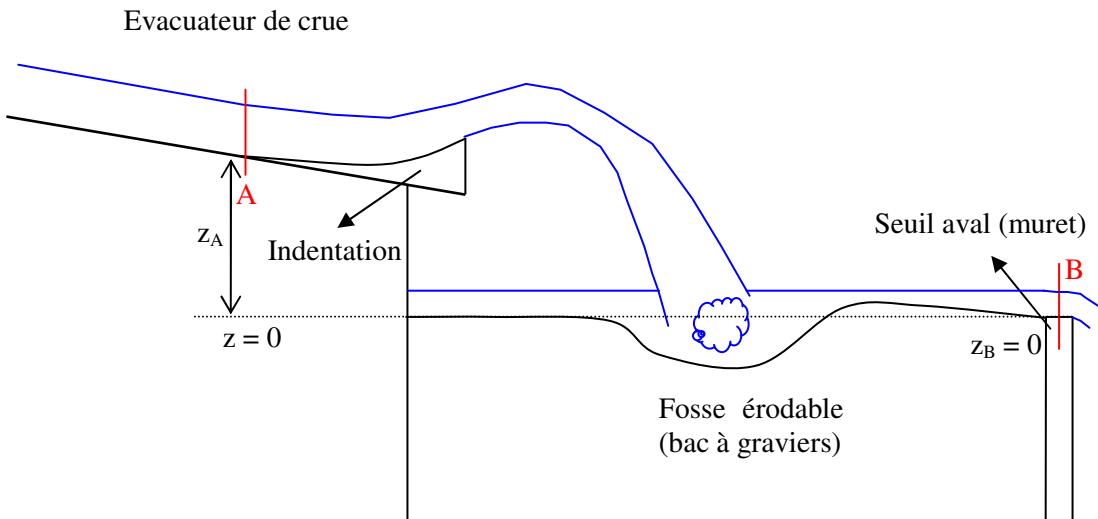


Figure 32 : Schéma du modèle réduit du laboratoire

Le théorème de Bernoulli [VIII] nous permet de comparer les énergies de A et B. Celui-ci stipule que la quantité d'énergie dans un écoulement fluide est constante le long d'une ligne de courant⁹, soit

$$\left(\frac{v^2}{2g} + h + z_f \right)_x = \text{constante } \forall x \in \text{ligne de courant} \quad \text{ou} \quad E_a = E_b$$

si :

- le fluide est parfait (c'est-à-dire que les effets visqueux sont nuls et qu'il est incompressible, soit à masse volumique constante) ;

⁹ Une ligne de courant est une courbe de l'espace tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse de l'écoulement en un instant donné [VII].

- le fluide est irrotationnel (c'est-à-dire que les particules de fluide ne subissent que des mouvements de translation) ;
- les forces volumiques dérivent seulement du potentiel g ;
- l'écoulement se fait en régime permanent ;
- les transferts de chaleur sont négligés.

Cependant cette égalité n'est pas respectée dans la réalité. Pour la rétablir, nous introduisons un terme de perte de charges :

$$\begin{aligned} E_a &= E_b + \text{pertes} \\ \Leftrightarrow \\ \text{pertes} &= E_a - E_b \end{aligned}$$

En comparant les quantités d'énergie en A et B, je peux quantifier les pertes de charge ayant lieu entre ces points. Cette dissipation d'énergie est due à de multiples facteurs :

- le frottement contre le fond et les parois latérales de l'évacuateur de crue entre le point de mesure et la sortie du canal ;
- le frottement contre les indentations ;
- le frottement du fluide projeté dans l'air ;
- l'impact dans la fosse d'érosion et le creusement de celle-ci ;
- les recirculations autour du jet dans la fosse ;
- le frottement dû au passage de l'eau entre les graviers jusqu'au seuil aval.

Pour faire ressortir au mieux l'influence de la géométrie des indentations sur la perte d'énergie, j'ai pris le point A le plus près de la base des indentations et le B au seul endroit de la fosse où je pouvais obtenir des mesures stables (voir Figure 32). J'observe que pour quantifier l'énergie, je dois donc mesurer la hauteur d'eau de l'écoulement, sa vitesse ainsi que l'altitude des points considérés. L'altitude z_A , par rapport au seuil aval, est mesurée avec le laser PD25 et vaut 0,123 m. Les mesures de hauteur d'eau et de vitesse sont expliquées dans les paragraphes suivants.

2.3.2.2 Sondes de distance

2.3.2.2.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement

Les sondes de distance sont des mic+25/IU/TC de chez *Microsonic* [3]. Cette sonde est utilisée dans ce travail pour déterminer la hauteur d'eau de l'écoulement en différents points. Sa gamme de fonctionnement est comprise entre 3 et 35 cm avec une précision minimale de 0,18 mm (celle-ci

diminué cependant entre 25 et 35 cm). La sonde dispose par ailleurs d'une correction des distances suivant la température ambiante de 0,17 %/°C (la vitesse du son dans l'air est une fonction croissante de la température [4]). Elle est équipée d'un affichage digital de la distance mesurée, d'une tige filetée associée à deux écrous pour la fixer et d'un câble l'alimentant en électricité et renvoyant les données vers un éventuel ordinateur. Cette sonde permet donc une lecture directe de la distance ou bien un enregistrement automatique via un ordinateur, la seconde option sera préférée pour ce travail étant que je cherche à établir des moyennes de hauteur d'eau.

Le principe de fonctionnement de cette sonde est le même que pour le télémètre laser, les seules différences sont la nature du faisceau émis et sa vitesse de propagation : un ultrason, au lieu d'un faisceau laser, se propageant à la vitesse du son au lieu de la vitesse de la lumière. La limite inférieure de détection est due au temps d'émission d'une impulsion ultrasonique. En effet, si l'objet est trop rapproché, l'onde réfléchie rejoint la sonde avant la fin de son émission et perturbe la mesure. La distance entre la sonde et un objet trop proche ne pourra donc être mesurée précisément. Il est important de remarquer que l'ultrason envoyé se propage en trois dimensions selon un cône dont le sommet part de la sonde. Si des objets parasites se situent dans le cône de détection, ils vont perturber et fausser la mesure. Il est à noter que pour obtenir des valeurs correctes, il faut que la sonde soit perpendiculaire à la surface à mesurer.



Figure 33 : Sonde de distance mic25+/IU/TC

2.3.2.2.2 Support

Pour mesurer les hauteurs d'eau nécessaires au calcul de l'énergie (voir Figure 32), je place trois sondes sur le modèle : deux sont fixées aux tiers et deux tiers d'une cornière (au-dessus du seuil déversant à l'aval du bac à graviers) et une à une plaque de plexiglas (à 46 cm du bout de l'évacuateur

de crue). Ces sondes sont ensuite reliées à un ordinateur qui va afficher les données transmises et stocker les distances résultantes. Au niveau de l'ordinateur, un indispensable travail de calibrage des sondes intervient parce que les données transmises par les câbles ne sont en fait que des valeurs de tension électrique. Chaque matin, il est donc nécessaire de trouver, pour chaque sonde, une équation liant la tension envoyée à la distance mesurée dans la réalité ; ce travail est réalisé en mesurant la valeur affichée à l'ordinateur pour quatre distances connues, il suffit ensuite de trouver la droite correspondant le mieux aux résultats via une interpolation par la méthode des moindres carrés (équation sur la figure ci-dessous)¹⁰. Il suffit ensuite de remplacer x par la valeur transmise par la sonde pour trouver la distance y en cm.

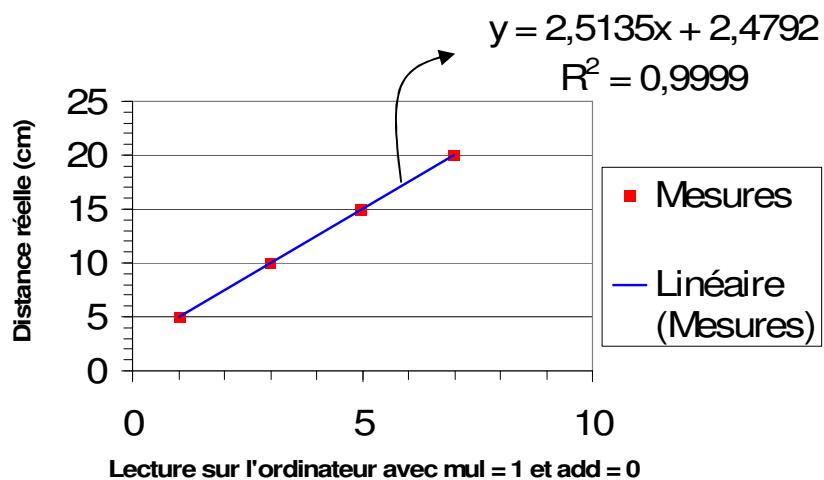


Figure 34 : Exemple de calibrage d'une sonde mic25+/IU/TC



Figure 35 : Sonde de distance sur l'évacuateur de crue, à l'amont des indentations

¹⁰ Cette droite est appelée une courbe de tendance. Une courbe de tendance est une courbe passant au mieux par une série de points donnés. Dans le programme Excel, nous pouvons choisir le style de courbe à faire passer (droite, polynomiale, exponentielle, puissance...). Le coefficient de détermination R^2 donne quant à lui le degré de concordance entre la courbe et les points, sa valeur va de 0 (concordance nulle) à 1 (concordance parfaite).

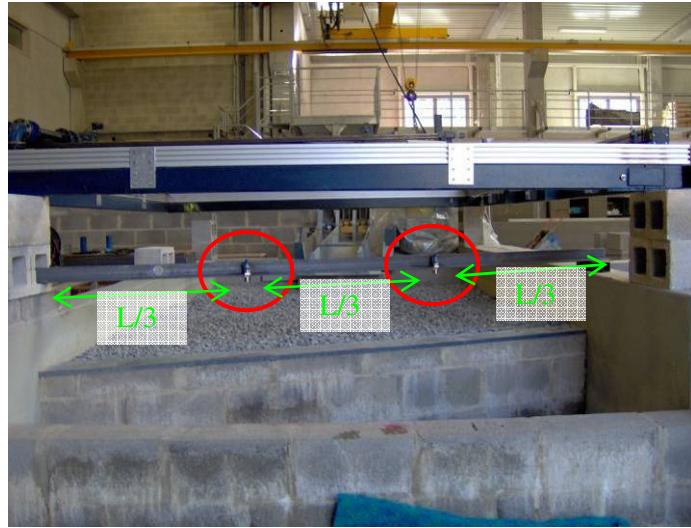


Figure 36 : Sondes de distance à l'aval de la fosse

2.3.2.3 Sondes de vitesse

Les sondes de vitesse proviennent de la firme « *Nixon Flowmeters Ltd* » [5]. Pour l'écoulement dans l'évacuateur de crue, j'utilise une « 404 high speed probe » dont la gamme de mesure va de 60 cm/s à 300 cm/s. Pour le seuil à l'aval de la fosse, je prends une « 403 low speed probe » dont la gamme de mesure va de 5 cm/s à 150 cm/s. La précision de ces sondes est de $\pm 1,5\%$ autour de la vitesse réelle. Ces sondes ont le même principe de fonctionnement. Elles sont constituées d'une tige métallique, contenant un fil électrique, au bout de laquelle se trouve une hélice en PVC. Lorsque cette hélice est mise dans un liquide conducteur en mouvement (l'eau dans notre cas), elle se met à tourner et le bout des pales passe à 0,1 mm du fil électrique : cela produit une variation d'impédance dans le fil qui permet de compter le nombre de passages des pales. Cette information est ensuite transmise à un fréquencemètre muni d'un afficheur digital, j'obtiens alors soit la fréquence toutes les secondes, soit la fréquence moyennée sur 10 secondes, soit le nombre cumulé de tours. Il reste ensuite à utiliser un abaque donnant la vitesse de l'écoulement en fonction de la fréquence. Pour éviter les imprécisions de lecture au niveau de l'abaque, j'ai recalculé les équations des droites $v = f(Hz)$ (voir tableau ci-dessous). Pour le calcul de l'énergie que je mène, je choisis d'utiliser le nombre cumulé de tours (pour ne pas avoir des résultats trop fluctuants) : je mesure le temps mis pour faire 10 000 tours et puis j'en tire une fréquence. Ces mesures sont prises juste à l'aval des sondes de hauteur pour ne pas perturber l'écoulement et fausser les distances.

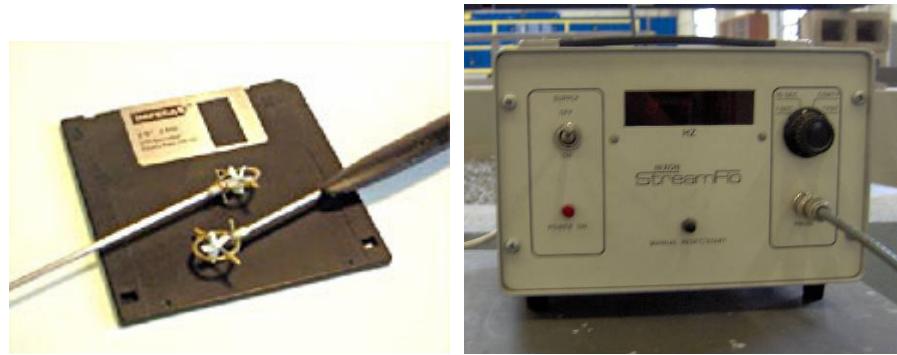


Figure 37 : Sondes 403 et 404 [5], fréquencemètre

Type de sonde	$v_{cm/s} = f(Hz)$
Sonde « 403 low speed probe »	$v_{cm/s} = 0,633.freq + 2,5$
Sonde « 404 high speed probe »	$v_{cm/s} = 2.freq + 6$

Tableau 4 : Equations des abaques des sondes de vitesse

2.3.2.4 Traitement des données

La quantité d'informations obtenue avec les sondes de distance ou de vitesse n'est pas du tout la même. La prise de mesure est continue (une par seconde) pour les sondes de distance tandis qu'elle est ponctuelle avec les sondes de vitesse (seulement quatre mesures en chaque point pour chaque essai comme expliqué en 2.4). Le traitement de ces données va donc être radicalement différent.

Les sondes de distance ne renvoient pas directement une hauteur d'eau mais bien la distance entre elles et l'eau : la hauteur d'eau évolue inversement à la distance mesurée. Pour obtenir les hauteurs d'eau, il est donc nécessaire de connaître au départ la distance entre les sondes et le canal ou le seuil. Je commence dès lors les mesures avant la mise en marche des pompes. Le traitement des données de distance se fait en plusieurs étapes :

- détermination de la position du fond de la section en prenant la moyenne des 50 premières valeurs enregistrées (il faut donc au moins une période de 50 secondes sans écoulement) ;
- calcul des hauteurs d'eau (h_i) en réalisant l'opération suivante sur chaque distance i (d_i)

$$h_i = -(d_i - \text{fond}) ;$$
- filtrage des valeurs supérieures à une constante a et inférieures à une autre constante b . En effet de l'eau qui éclabousse les sondes peut leur faire enregistrer des valeurs absurdes. Cela permet aussi de ne garder que le régime permanent de l'essai.
- calcul d'une hauteur moyenne en prenant la moyenne sur plusieurs intervalles. En effet lors de mes opérations de ratissage, il se peut que le niveau d'eau varie fortement ; il est donc nécessaire d'éviter ces transitions et de moyenner les hauteurs par morceau.

La figure ci-dessous donne en exemple le traitement des données de la sonde en rive droite sur le seuil pour le cas 1. Le graphe supérieur représente les distances renvoyées par la sonde, l'intermédiaire donne les hauteurs calculées et l'inférieur donne les hauteurs conservées. Les hauteurs y ont été filtrées entre 1 cm et 4,5 cm et puis moyennées sur les intervalles suivants : [250 ; 1300], [1600 ; 2000], [2200 ; 3500] et [4000 ; 4900].

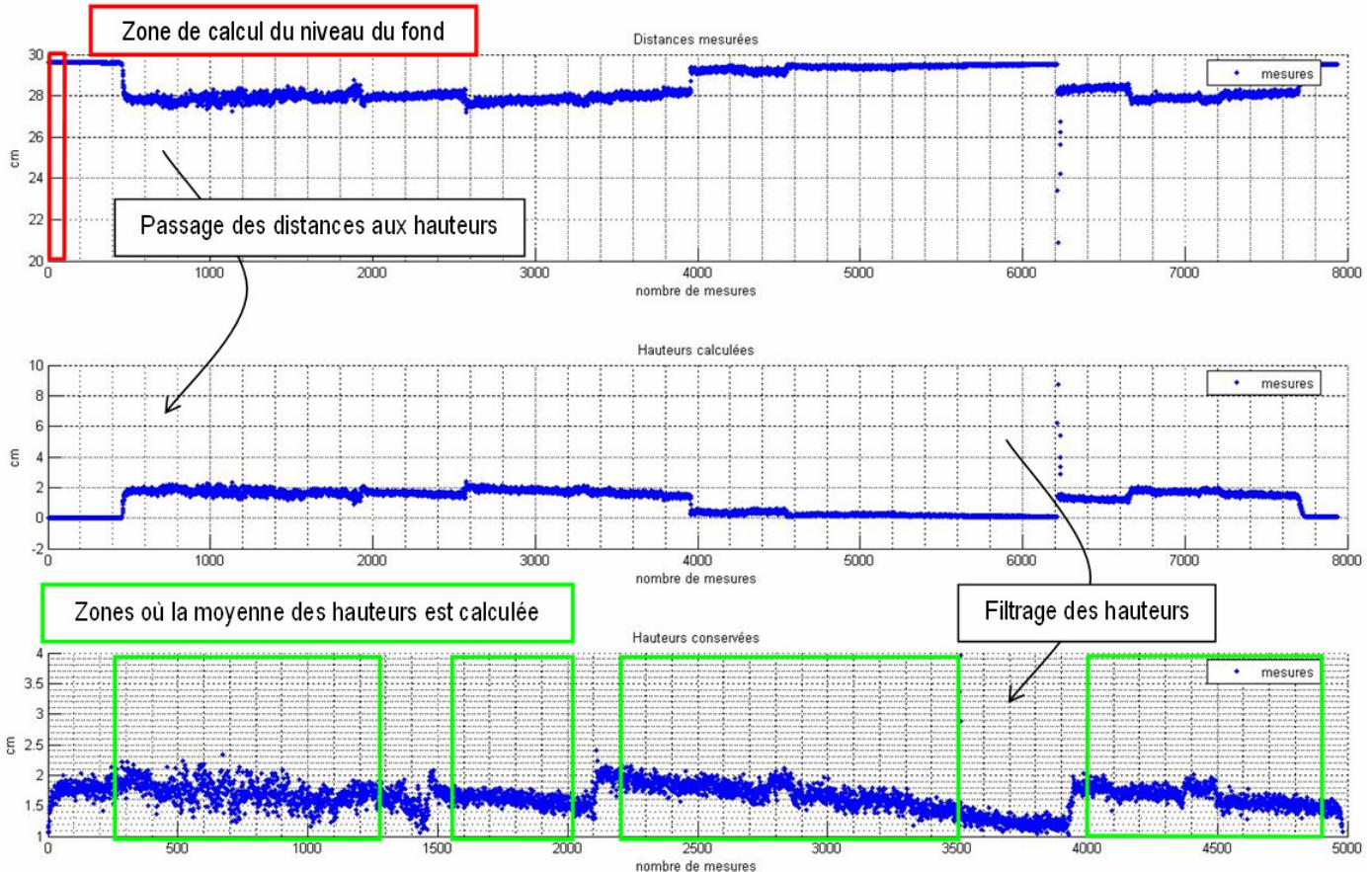


Figure 38 : Schéma du traitement des données de hauteur, cas 1, sonde aval droite

Le traitement des résultats des sondes de vitesse est beaucoup plus rapide du fait du peu de données à traiter. Je filtre d'abord les durées chronométrées (certaines valeurs ne sont pas à prendre en compte du fait d'une mauvaise mise en place de la tige dans l'écoulement ou d'un problème avec le fréquencemètre qui a aussi besoin d'une période de chauffe) et puis je les transforme en fréquences et enfin en vitesses grâce aux équations du Tableau 4. Après, il ne reste plus qu'à calculer la moyenne de ces vitesses.

2.3.3 Répartition du débit sur les indentations

La répartition du débit à la sortie de l'évacuateur de crue peut différer selon que l'on se trouve sur une indentation ou dans un creux. Cela peut être dû à l'eau qui tombe latéralement des indentations avant d'être sortie du canal. Pour quantifier cette inégale répartition des débits, je mesure la hauteur d'eau (h) et la vitesse (v) sur chaque indentation et dans chaque creux. Le débit est ensuite calculé en considérant ces variables constantes sur la largeur (l) de l'indentation ou du creux qu'elles représentent.

$$\text{Il vient } Q_{\text{indentation ou creux}} = v_{\text{indentation ou creux}} \cdot (l_{\text{indentation ou creux}} \cdot h_{\text{indentation ou creux}})$$

Pour les hauteurs, j'utilise un support percé de cinq trous à intervalles réguliers pour que les sondes mesurent les hauteurs soit sur les dents soit dans les creux (ce système pose néanmoins des problèmes pour les cas 6 et 9 où les dents ne sont pas placées juste en dessous des sondes). Comme les sondes doivent être perpendiculaires à la surface à mesurer pour fonctionner, je mesure à chaque fois les hauteurs d'eau en deux étapes pour chaque cas (un cas où l'on mesure les creux et un autre cas pour les indentations). Ces mesures de hauteur durent 5 minutes chacune une fois le débit stabilisé, cela permet d'obtenir 300 valeurs. Le traitement des données se fait ensuite de la même façon qu'en 2.3.2.4.

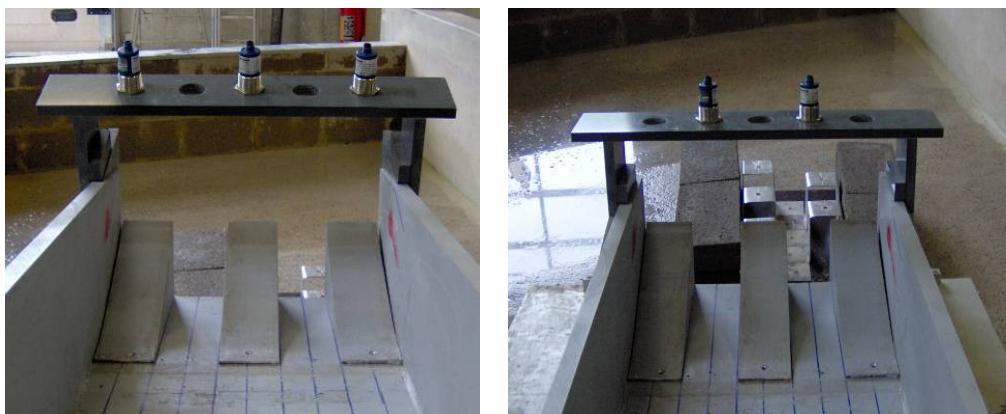


Figure 39 : Position des sondes (inclinées à gauche et à plat à droite)

Pour les vitesses, j'utilise la sonde « 404 high speed probe » puisque l'écoulement est dans l'évacuateur de crue. Les vitesses sont mesurées en plaçant la sonde perpendiculairement à l'écoulement juste avant la sortie de l'eau du canal et au milieu des indentations ou des creux. Cette fois je mesure le temps nécessaire pour accomplir 2000 tours et cela quatre fois de suite pour être sûr d'avoir une valeur fiable et constante. Le traitement des temps mesurés est quant à lui le même qu'en 2.3.2.4.

2.3.4 Etude des jets

Les jets, entre leur sortie du canal et leur point d'impact dans l'eau, sont le seul endroit de l'écoulement où nous ne pouvons quantifier leurs caractéristiques : il est effet très compliqué de mesurer quelque chose dans un jet tridimensionnel sans en perturber l'écoulement. Je me borne donc à une analyse qualitative des jets via des photographies prises lors des essais : j'examine la dispersion spatiale des jets par rapport à la largeur des indentations, les interactions entre les jets et la zone d'impact pour chaque cas. En plus, je mesure les angles d'impacts des jets passant par les creux et par les indentations. Un jet passant par une indentation a un angle d'impact de maximum 37° (cas 2 et 5 ci-dessous) tandis que l'angle pour un jet passant par un creux est de 16° (cas 5 ci-dessous). Pour les cas où les creux et les indentations sont présents simultanément, les angles des jets varient entre ces deux valeurs lorsque de l'eau tombe des indentations (cas 5 ci-dessous).

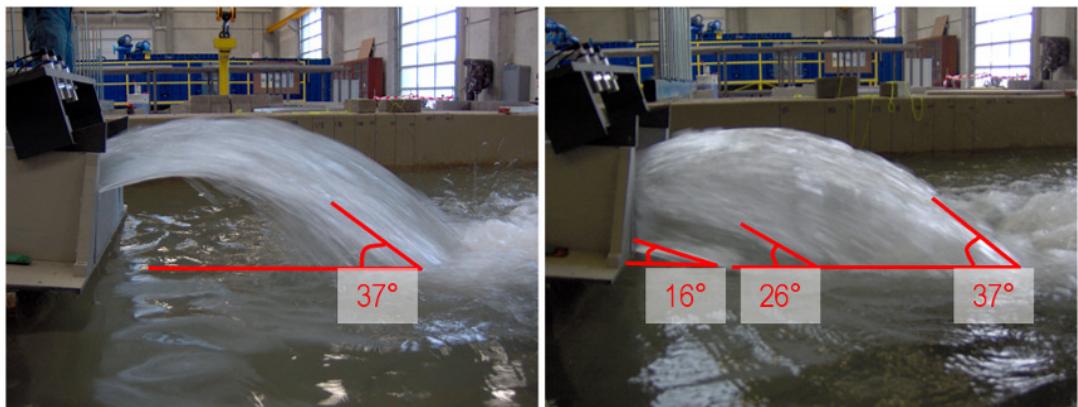


Figure 40 : Angles d'impacts des jets (cas 2 à gauche et cas 5 à droite)

2.3.5 Etude du champ de pression sous les jets

J'aborde en premier lieu les sondes utilisées pour mesurer la pression et en second lieu j'explique le traitement des données pour obtenir des caractéristiques intéressantes.

2.3.5.1 Sondes de pression

2.3.5.1.1 Caractéristiques et principe de fonctionnement

Les sondes de pression sont des PR-41PRO de la firme *Keller*. Leur gamme de mesure va de 0 à 100 mbar, c'est-à-dire de 0 à 1 m d'eau. Ces sondes sont en fait des transmetteurs de pression : elles transforment la mesure de pression en signal électrique et le renvoient vers un boîtier relié à un ordinateur. Ces transmetteurs utilisent des cellules capacitatives en céramique de haute stabilité et intègrent les compensations individuelles de température et l'ajustement, sans potentiomètres, du zéro et du gain [11].



Figure 41 : Transmetteur de pression PR-41PRO

Le principe de fonctionnement de ces sondes se base sur la technique capacitive à deux fils : la pression ambiante est transmise, via les membranes isolantes de la sonde et un fluide de remplissage, à une membrane détectrice placée au centre de la sonde. Cette membrane fléchit suite à la pression différentielle qu'elle subit (pression ambiante d'un côté et pression de l'air de l'autre côté). Le déplacement dû à cette flexion est ensuite détecté par les plaques d'un condensateur, il s'en suit une différence de capacité entre la membrane détectrice et les plaques du condensateur : c'est cette différence qui est convertie en un signal électrique ensuite renvoyé vers un ordinateur [12].

2.3.5.1.2 Support

Chaque sonde peut être simplement fixée avec un boulon à une plaque percée. Il reste ensuite à choisir où placer ces sondes dans la fosse et à quelle distance de la dalle. Physiquement, le meilleur emplacement serait la position du point le plus profond de la fosse. Pratiquement, la sonde est placée le capteur vers le haut et donc son fil de sortie (pas très souple) vers le sol, il faut donc laisser un espace minimal entre la sonde et le socle sur lequel elle repose. Il n'est dès lors pas possible de fixer les sondes dans un espace inférieur à 15 cm. Il n'y a cependant aucun souci pour placer la fosse aux coordonnées (x,y) voulues. Au final, les sondes sont fixées sur des cavaliers de 16 cm de hauteur. Ces cavaliers sont ensuite accrochés à une plaque de contreplaqué de 2 cm d'épaisseur qui est lestée avec des blocs de béton pour éviter que le jet ne déplace les sondes pendant l'essai et ne fausse les résultats. Les capteurs des sondes se trouvent au final à 19 cm de la dalle. Comme je ne dispose que de cinq sondes, je vérifie d'abord que la pression venant des jets peut être considérée comme symétrique selon l'axe du canal (voir 2.5.6.1). Les sondes sont disposées selon le schéma suivant :

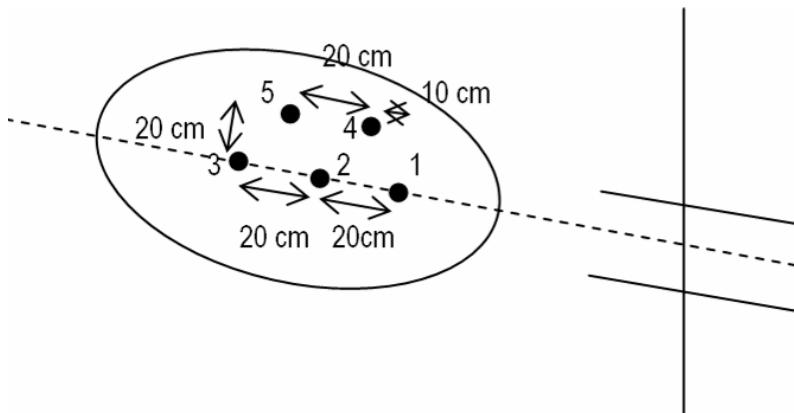


Figure 42 : Disposition des sondes de pression



Figure 43 : Cavaliers fixés sur la plaque de contreplaqué

La sonde n°2 sera placée à la hauteur du point le plus profond de chaque fosse afin de saisir au mieux le phénomène de creusement. Pour obtenir des valeurs de pression d'eau, je calibre les sondes de pression selon le même schéma que les sondes de distance et je trouve des équations de droite liant le signal électrique à la pression d'eau.

2.3.5.2 Traitement des données

Je choisis de mesurer les valeurs de pression à la fréquence de 100 Hz qui permet de détecter le phénomène de la turbulence. Les essais de pression sont réalisés pendant 15 min ce qui donne 90 000 mesures par sonde. En représentant sur un graphique l'évolution de la pression en fonction du temps, je constate qu'il est assez compliqué d'en tirer une quelconque information, excepté le fait que la pression oscille très rapidement autour d'une valeur centrale (voir figure ci-dessous où ce sont les mesures de la sonde 1 du cas qui sont utilisées). Pour exploiter ces données, il me faut d'abord étudier s'il est possible de leur appliquer une loi statistique. Pour cela, je passe à une représentation en histogramme à 50 classes qui me permet de rejeter d'éventuels « outliers »¹¹ et de donner une première estimation de la symétrie et de l'éventuelle loi statistique à choisir [IX].

¹¹ Terme anglais désignant des valeurs extrêmes et qui sont des erreurs.

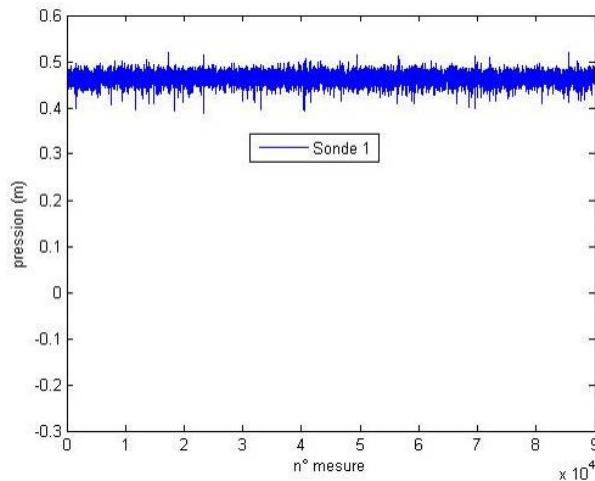


Figure 44 : Mesure de la sonde 1, cas 2

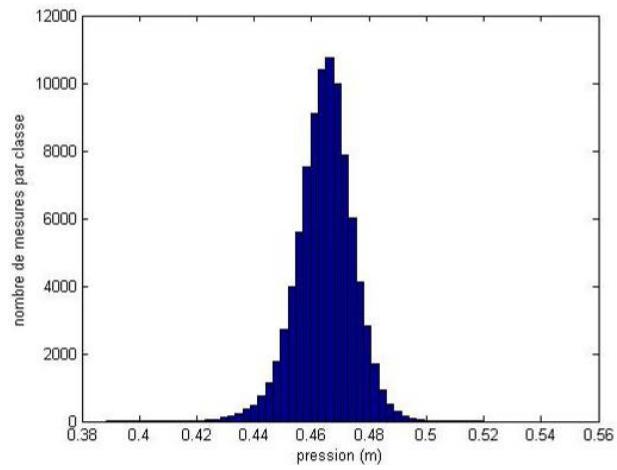


Figure 45 : Histogramme des mesures de la sonde 1, cas 2

L'histogramme présente une forte symétrie par rapport à son axe central. Cela m'amène à vérifier si les mesures suivent une loi de distribution normale. Cette loi théorique est caractérisée par son allure symétrique en forme de cloche. Cette loi dépend uniquement de la moyenne arithmétique (μ) et de l'écart-type (σ) des mesures. Son équation est

$$f(x) = \frac{e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

où x représente les mesures et $f(x)$ donne la densité de probabilité de la mesure. Cette loi a aussi pour particularité d'avoir une moyenne¹² et une médiane¹³ égale et de regrouper 68,3 % des valeurs dans l'intervalle $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$ et 95,5 % des valeurs dans $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ [IX]. Pour la sonde 1 du cas 2, je trouve une moyenne de 0,4645 m et une médiane de 0,465 m, je peux donc dire qu'elles sont égales. Les intervalles dépendant des écarts-types regroupent respectivement 72,2 % et 95,3 % des mesures. Le premier intervalle regroupe un peu plus de données que prévu et le second est presque à la valeur attendue. En plus de ces comparaisons numériques, l'emploi du « normal probability plot » ou « Droite de Henry » va permettre de tester graphiquement la normalité des données (au mieux les « + » bleus sont proches de la droite rouge, au mieux les mesures sont proches d'une loi normale) [IX].

¹² La moyenne est la somme de toutes les mesures divisée par le nombre de mesures.

¹³ La médiane est la valeur à laquelle 50 % des mesures sont inférieures et 50 % supérieures.

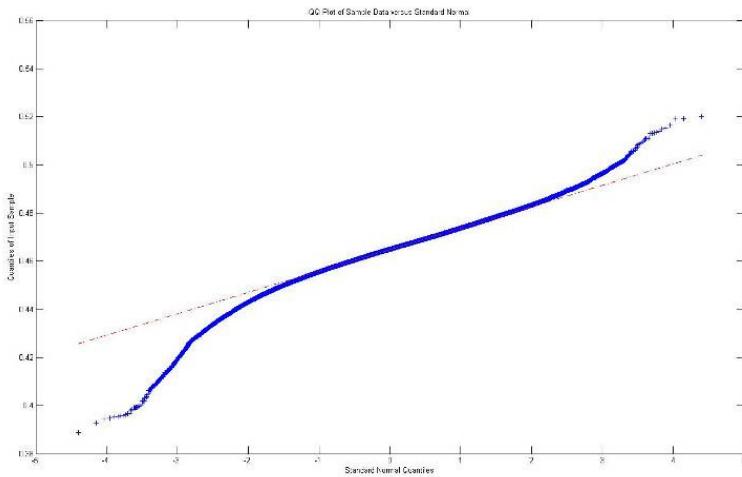


Figure 46 : Mesures et Droite de Henry, sonde 1, cas 2

Je constate que les mesures de pression entre 0,45 m et 0,49 m sont alignées sur la « Droite de Henry » tandis qu'elles s'éloignent de la normalité respectivement avant et après ces valeurs. En résumé, vu la symétrie de l'histogramme, la bonne adéquation entre les valeurs numériques et celles attendues ainsi que les données s'accordant bien à la « Droite de Henry » sur une bonne part des mesures, j'affirme que la distribution de pression est proche d'une loi normale.

Pour étudier les résultats des sondes entre elles, un histogramme donnant la valeur moyenne entourée par l'intervalle $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ (regroupant approximativement 95,5 % des valeurs vu l'hypothèse de distribution normale) est tracé pour chaque sonde de chaque cas (l'intervalle est représenté par la tige noire en « double-T »). La comparaison des histogrammes des différents cas permettra d'apprécier la variation des pressions.

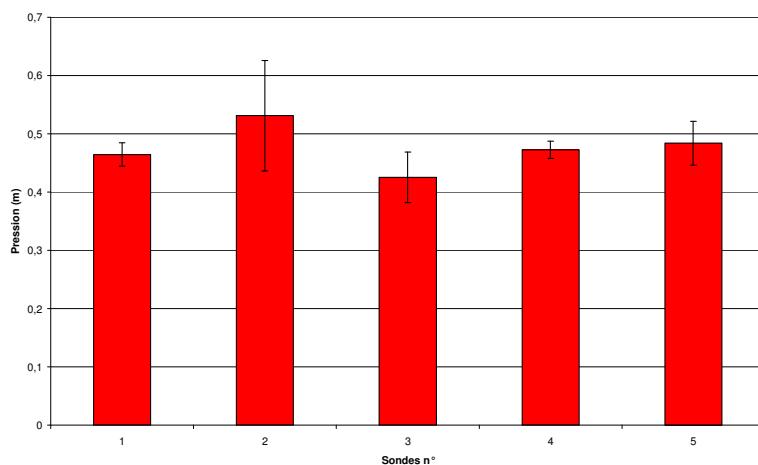


Figure 47 : Moyenne et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2

2.4 Protocole expérimental

Les essais pour ce mémoire se sont déroulés en deux campagnes durant les mois d'avril et mai. La première campagne a servi à mesurer la fosse et les énergies amont et aval pour les 15 cas présentés en 2.2. La seconde permit de mesurer la répartition des débits sur les indentations et le champ de pression sous les jets pour les cas 1 à 6, 9 et 15 (nous verrons en 2.5 qu'il n'était pas utile de faire varier les débits ni de tester les cas 7 et 8 pour le test des pressions).

La première campagne dura 15 jours, c'est-à-dire qu'un seul essai était réalisé par jour. Le planning d'une journée normale d'essai était le suivant :

- mesure grâce au cadre laser de la fosse de la veille (une nuit entière est nécessaire pour sécher les graviers afin d'obtenir des résultats valables) ;
- remblaiement de la fosse et changement des indentations ;
- mesure de la hauteur du bac à graviers et mise en place des sondes de hauteur (avec temps de chauffe et calibrage) et de vitesse sans toucher le bac ;
- lancement de l'essai en lui-même :
 - enregistrement des valeurs des sondes de hauteur pour obtenir la position des fonds de section ;
 - mise en marche des pompes et stabilisation au débit voulu ;
 - période de 2 h pendant laquelle le débit est stationnaire : durant cette période le bourrelet créé à l'aval de la fosse est ratissé toutes les 20 minutes (déplaçant alors les graviers vers les côtés et les coins amont du bac en évitant la fosse) tandis que les vitesses sont mesurées juste à l'aval des sondes toutes les 30 minutes et que les hauteurs d'eau sont prises en continu. Les sondes de distance sont aussi essuyées régulièrement pour éviter les erreurs de mesure ;
 - arrêt des pompes ;
- vidange de l'eau du bac à graviers par la mise en route d'une pompe dans le coin amont gauche et rangement de tous les instruments.

N.B. : Les essais n'ont pas été répétés sur une période plus longue ; j'ai en effet constaté que l'essentiel du creusement se produit lors de la première demi-heure de l'essai. La période de 2 h est donc amplement suffisante.

La seconde campagne dura 5 jours et ne fut possible qu'après l'extraction complète des graviers de la fosse. La durée des essais fut beaucoup plus courte puisque je ne mesurais les pressions que pendant 15 minutes, les hauteurs pendant 10 minutes et les vitesses pendant 15 minutes. Un essai complet se déroule selon le schéma suivant (en supposant que toutes les sondes aient déjà été calibrées) :

- mise en place de la plaque avec les capteurs de pression et des sondes de distance ;
- enregistrement des valeurs des sondes de hauteur pour obtenir la position des creux ;
- mise en route des pompes et stabilisation du débit ;
- enregistrement des hauteurs pendant 5 minutes ;
- arrêt des pompes ;
- changement de l'inclinaison des sondes de hauteur et enregistrement des hauteurs pour obtenir la position des indentations ;
- mise en route des pompes et stabilisation du débit ;
- enregistrement des hauteurs pendant 5 minutes ;
- mesure des vitesses sur les creux et les indentations ;
- mesure de la pression pendant 15 minutes ;
- arrêt des pompes et vidange du bac si les sondes de pression doivent être changées de place.

N.B. : Pour ne pas perturber les mesures de pression, il avait été décidé de ne pas mesurer les vitesses en même temps ce qui aurait cependant pu diminuer la durée des essais.

2.5 Résultats

J'étudie d'abord les paramètres des fosses. Pour expliquer ces paramètres, j'aborderai ensuite l'étude de la dissipation d'énergie sur le modèle, de la répartition du débit sur les indentations, de la forme des jets et de la pression qu'ils génèrent sous eux dans la fosse. Enfin, je présenterai une synthèse de tous les essais et des résultats auxquels je suis arrivé.

2.5.1 De la reproductibilité des essais

Certains essais ont été réalisés plusieurs fois pour s'assurer de leur reproductibilité. Pour chacun des paramètres abordés, nous détaillons les résultats obtenus à partir d'essais identiques. Cela nous permettra de valider l'approche scientifique choisie pour étudier ces paramètres et de donner des intervalles de confiance des résultats.

2.5.2 Paramètres de la fosse

Avant d'étudier la reproductibilité des essais (dix essais avec un débit de 60 l/s et cinq essais à débit variable) un tableau synthétique présente les paramètres associés aux quinze essais :

Cas	x_i (cm)	x_f (cm)	y_i (cm)	y_f (cm)	V (m^3)	S (m^2)	ρ_{rel} (m)	ρ_{abs} (m)	D_{max} (cm)	L (cm)	l (cm)	Forme	$D_{intacte}$ (cm)	L_1 (cm)	L_2 (cm)	l_1 (cm)	l_2 (cm)	α_{beta_1} (%)	α_{beta_2} (%)	β_{beta_1} (%)	β_{beta_2} (%)	
1	51	180	60	261	0,277	1,75	0,376	1,536	116	190	110	ovale	25	90	100	55	55	42	38	68	68	
2	42	186	42	243	0,263	1,85	0,445	1,594	140	185	130	rectangle	40	100	60	65	65	45	74	68	68	
3	45	180	45	264	0,322	1,94	0,429	1,569	116	190	125	ovale	25	90	95	60	60	48	45	72	72	
4	45	180	45	237	0,217	1,53	0,335	1,475	83	185	115	ovale	25	65	110	55	55	52	30	61	61	
5	45	171	45	180	0,129	1,13	0,294	1,435	91	115	110	ronde	25	55	60	55	55	53	49	53	53	
6	60	165	45	261	0,158	1,47	0,295	1,43	83	190	95	ovale	25	60	130	50	50	45	49	23	59	66
7	51	180	45	174	0,114	1,08	0,285	1,411	86	110	115	ronde	20	60	50	55	60	48	57	52	48	
8	45	165	45	210	0,129	1,25	0,301	1,433	80	140	110	ovale à ronde	20	60	80	55	55	50	38	55	55	
9	45	180	51	198	0,184	1,31	0,335	1,474	89	130	115	ronde	25	60	60	50	55	56	56	67	52	
10	45	180	45	267	0,336	1,91	0,43	1,554	127	200	125	ovale	25	110	90	62,5	62,5	39	48	69	69	
11	75	150	45	150	0,031	0,55	0,163	1,294	74	90	60	rectangle	12,5	60	30	30	30	27	54	54	54	
12	45	165	45	210	0,145	1,38	0,333	1,453	116	150	110	rectangle	25	85	45	55	55	39	74	61	61	
13	60	150	51	135	0,015	0,40	0,107	1,255	52	60	70	2 ovales	15	35	30	20	20	31	36	54	54	
14	60	165	45	150	0,064	0,78	0,222	1,352	74	95	95	2 ovales	20	50	40	30	30	44	56	74	74	
15	39	189	45	249	0,391	2,18	0,472	1,594	137	195	150	ovale	15	100	60	60	60	47	79	79	79	

Tableau 5 : Résultats des fosses

2.5.2.1 De la reproductibilité des essais d'érosion

La reproductibilité des essais d'érosion n'est pas nécessairement assurée. En effet, nous sommes en présence d'un milieu assez hétérogène à petite échelle où se succèdent des graviers et des vides : la question est donc de savoir si la mise en place de ces graviers, leur léger compactage au râteau et les résultats de la fosse précédente influencent les résultats. Il a donc été décidé de réaliser deux fois la configuration du cas 3 : ce sont les cas 3 et 10. En observant leur représentation graphique, nous constatons déjà la ressemblance presque parfaite entre ces cas : elles ont la même forme (que nous qualifions d'ovale), sont situées au même emplacement dans le bac à graviers (les extrémités aval des fosses sont identiques) et ont des dimensions similaires.

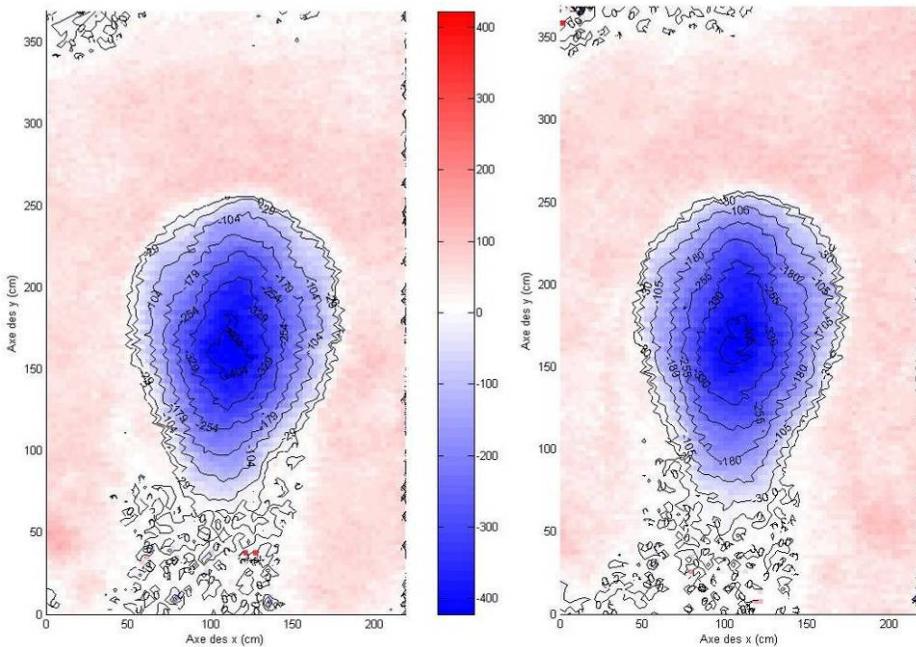


Figure 48 : Fosses des cas 3 (gauche) et 10 (droite)

Cas	V (m ³)	S (m ²)	p _{rel} (m)	p _{abs} (m)	D _{max} (cm)	L (cm)	I (cm)	Forme	D _{intact} (cm)
3	0,322	1,94	0,429	1,569	116	190	125	ovale	25
10	0,336	1,91	0,43	1,554	127	200	125	ovale	25
(3) - (10)	-0,014	0,03	-0,001	0,015	-11	-10	0	/	0

Tableau 6 : Paramètres des cas 3 et 10

Au vu de l'intervalle de validité de p_{rel} (voir 2.3.1.2), nous observons que ce paramètre est égal pour les deux cas. La profondeur absolue n'est cependant pas la même, cela est sans doute dû au point correspondant à cette profondeur : le rayon laser est peut-être passé entre deux cailloux dans le cas 3 et pas dans le cas 10 ce qui conduirait à une différence de 15 mm, inférieure à l'erreur maximale due au positionnement des graviers. Le volume du cas 10 est légèrement plus grand que celui du cas 3.

Vu la superposition des intervalles de validité, les volumes ne peuvent être considérés comme différents :

Cas	$(V - S.0,006)$ (m ³)	V (m ³)	$(V + S.0,006)$ (m ³)
3	0,31	0,322	0,333
10	0,325	0,336	0,348

Tableau 7 : Intervalles de validité pour les cas 3 et 10

La moyenne des volumes vaut 0,329 m³ et l'écart est donc de 0,007 m³ par rapport à celle-ci. Cela nous permet de définir un autre intervalle de validité de 0,014 m³ pour le volume. Cet intervalle n'est cependant pas constant avec les essais : il est décroissant en fonction du volume. En effet, plus le volume calculé est petit, plus l'intervalle décroît puisqu'à la limite l'intervalle est nul dans le cas d'un volume nul. En supposant que la variation de l'intervalle est en corrélation linéaire avec la variation du volume, nous trouvons l'équation suivante $i = V.0,021$, i étant le volume à enlever ou à rajouter à la valeur de base. Les surfaces sont aussi semblables. La distance du fond de fosse au seuil ainsi que la longueur de la fosse sont supérieures d'une dizaine de centimètres pour le cas 10. Cette différence pour la distance est simplement due à la forme assez plane du fond de fosse : il n'est donc pas étonnant d'avoir cet écart. La « distance intacte » est équivalente pour les deux cas.

Un point important était de savoir si les résultats du creusement de la fosse antérieure influençaient les paramètres de la fosse actuelle. Le cas 3 fut testé après le cas 2 qui avait donné une fosse de 0,263 m³ tandis que le cas 10 fut réalisé après le cas 9 qui avait donné une fosse de 0,184 m³. Vu les résultats très proches des cas 3 et 10, nous pouvons affirmer que la fosse antérieure n'influence pas significativement l'état de la fosse actuelle.

Après tous ces commentaires, nous pouvons donc conclure que les essais d'érosion sont reproductibles pour tous les paramètres et que l'intervalle de validité autour d'un volume d'à peu près 0,33 m³ est de 0,014 m³. Nous gardons cependant comme intervalle de validité autour du volume pour chaque cas le plus grand des deux termes suivants : (S.0,006) et (V.0,021).

2.5.2.2 *Etude des volumes, surfaces et profondeurs*

Nous distinguons les essais à débit constant de ceux à débit variable. Les premiers permettent de faire une comparaison en se basant uniquement sur la forme des indentations tandis que les seconds furent réalisés pour comparer l'évolution des fosses dans deux cas à débit variable.

2.5.2.2.1 A débit constant

Je représente les volumes des fosses, leurs surfaces et leurs profondeurs relatives et absolues avec leurs intervalles de validité au moyen d'histogrammes cumulés : pour chaque essai, le premier élément du bâtonnet donne la valeur basse de l'intervalle, le second morceau additionné au premier présente la valeur calculée et la somme des trois la valeur haute de l'intervalle.

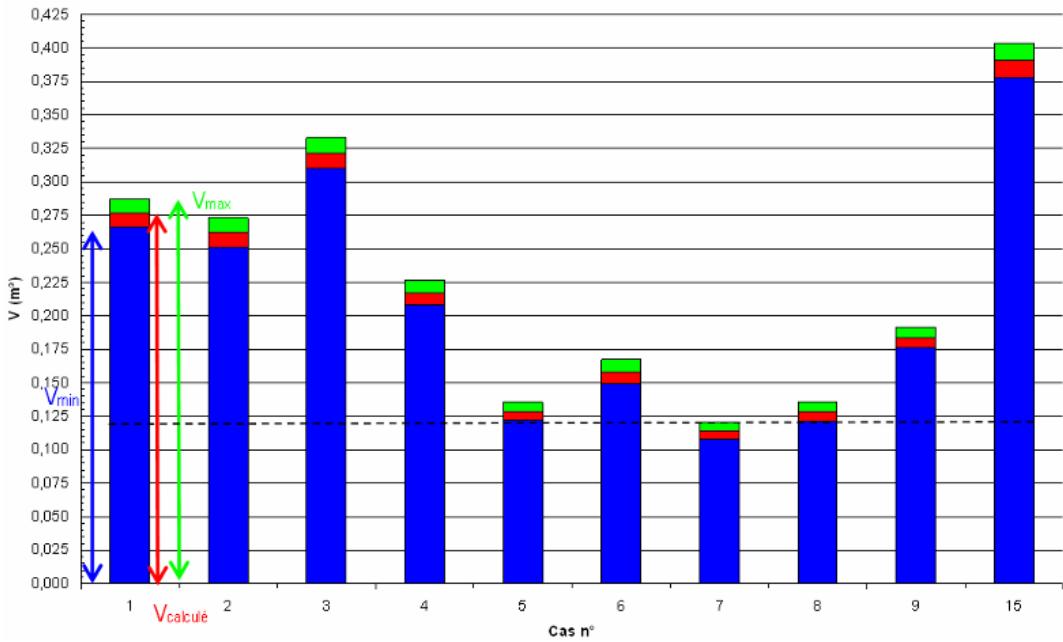


Figure 49 : Comparaison des volumes à débit constant

Nous constatons des différences assez notables entre les cas. En premier lieu, il faut noter que les volumes des cas 2 et 15 pourraient être encore plus grands si nous avions disposé d'un bac plus profond parce que le fond de fosse a été atteint (voir le graphique relatif aux profondeurs absolues). Les valeurs de volume pour ces cas sont donc biaisées et doivent être traitées avec précaution. Le meilleur cas est le n°7 ; vu la ligne en pointillés qui est placée au niveau V_{max} du cas 7, nous pouvons dire que sa valeur est inférieure aux cas 5 et 8 égaux entre eux. Nous avons ensuite pour des volumes croissants les cas 6, 9, 4, puis les cas 1 et 2 considérés comme égaux vu leurs intervalles, le 3 et enfin le 15. Les valeurs des cas 3 et 15 paraissent surprenantes puisque nous nous attendions, en plaçant des indentations, à voir baisser le volume excavé par rapport au cas de base 1. De même, il n'y a pas de diminution de volume du cas 1 au cas 2 alors que dans la réalité le saut de ski diminue l'impact du jet sur la fosse. En regardant les extrêmes, nous voyons que le volume du cas 15 est 3,4 fois plus grand que le cas 7 ; ceci nous montre qu'il est possible de diminuer sensiblement le volume érodé en choisissant correctement la disposition des indentations.

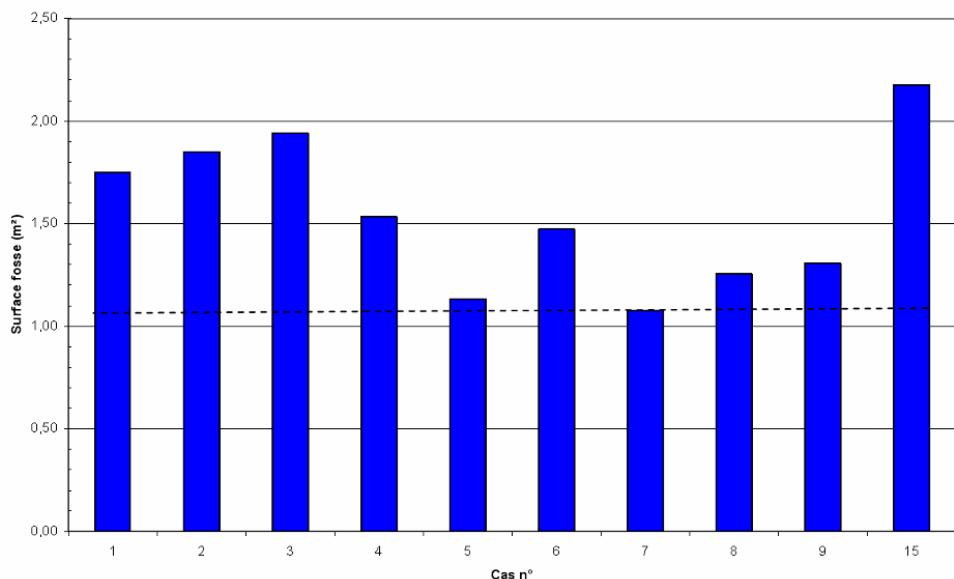


Figure 50 : Comparaison des surfaces à débit constant

L'étude des surfaces conduit à peu près aux mêmes constatations que pour les volumes. La plus petite est celle du cas 7. Elle est suivie de près par le cas 5. Nous avons ensuite les cas 8 et 9 qui sont presque égaux, puis viennent les cas 4 et 6, ensuite les cas 1, 2 et 3 et enfin le cas 15 qui occupe la surface la plus importante. Pour les cas 6 et 9, l'ordre de croissance des surfaces est inverse à celui des volumes. L'étude des surfaces est moins précise que celle des volumes puisque nous ne connaissons pas les intervalles de validité des surfaces. Le rapport entre les surfaces extrêmes vaut 2.

Contrairement aux paramètres enregistrés des volumes, les surfaces des cas 2 et 15 ne sont pas biaisées. Une certaine surface de graviers a été enlevée sous l'effet de l'eau au fond du bac et il est possible que nous aurions pu observer d'avantage encore de creusement si le bac avait été plus profond. Sur la figure suivante, le volume réel de l'excavation est A tandis que le volume théorique (s'il n'y avait pas de fond au bac) serait (A + B). A ces deux volumes correspond bien une dimension inchangée au sommet du bac. En passant à une vision en trois dimensions, nous concluons que la surface en tête de fosse est la même quelque soit la position du fond du bac.

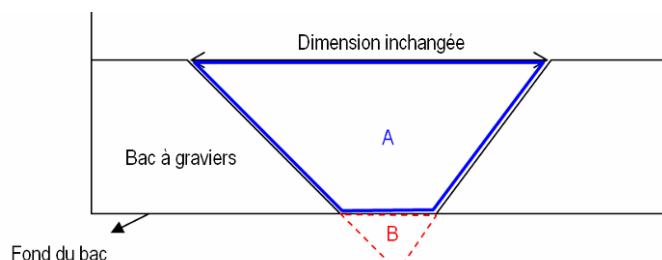


Figure 51 : Volumes et surfaces pour des fosses atteignant le fond du bac

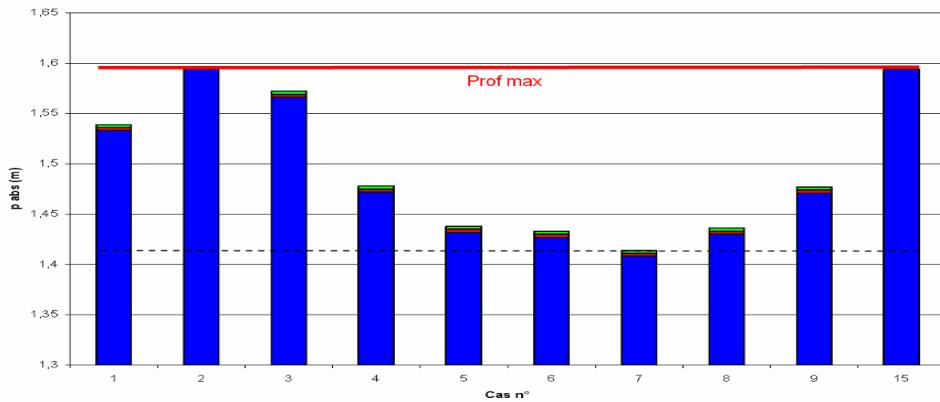


Figure 52 : Comparaison des profondeurs absolues à débit constant

Puisque nous connaissons la cote laser du fond du bac (1594 mm), la représentation des profondeurs absolues permet de voir les cas où ce fond est atteint : soit les cas 2 et 15. La profondeur minimale est encore obtenue pour le cas 7. Pour l'étude globale des profondeurs, nous nous basons plutôt sur les profondeurs relatives qui indiquent la différence la plus grande entre les niveaux d'avant et d'après essai.

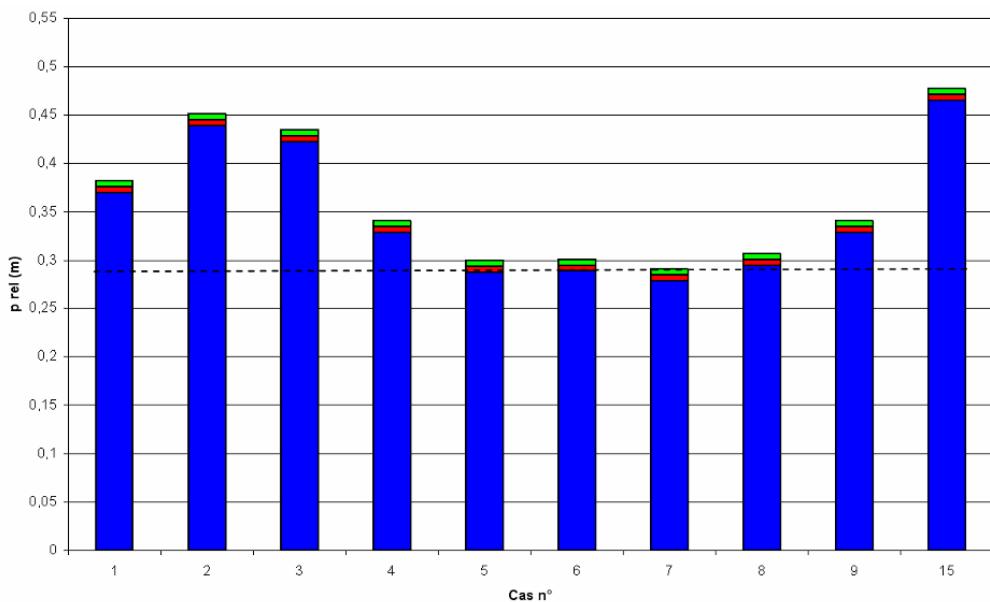


Figure 53 : Comparaison des profondeurs relatives à débit constant

Les profondeurs relatives présentent peu de contraste pour les cas 5 à 8. Dans ce lot, le cas 7 présente de nouveau la plus petite caractéristique et est, au vu des intervalles, tout juste en dessous des trois autres. Après ce groupe viennent les cas 4 et 9 qui sont égaux, puis les cas 1, 3, 2 et 15. Le rapport entre les profondeurs extrêmes vaut 1,6.

Il est aussi intéressant de représenter graphiquement le volume et la surface en fonction de la profondeur relative pour voir s'il existe une corrélation entre ces divers paramètres.

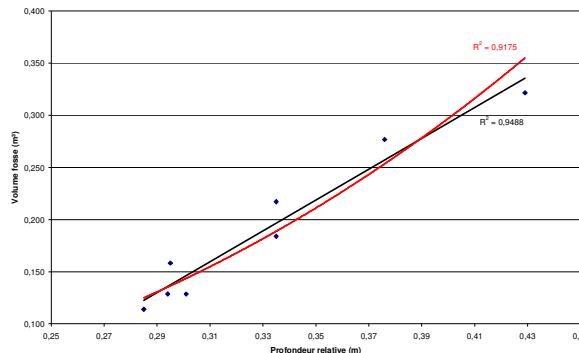


Figure 54 : « Volume-Profondeur Relative » pour Q60

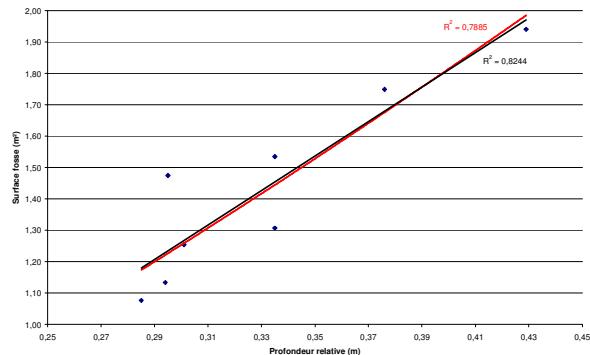


Figure 55 : « Surface-Profondeur Relative » pour Q60

Nous avons représenté tous les cas à débit constant à l'exception du 2 et du 15 où les volumes et profondeurs étaient biaisés. Nous avons fait passer des courbes de tendance avec leur coefficient de détermination sur chaque graphique : les courbes en rouge sont des courbes de puissance tandis que celles en noir représentent des droites. Les coefficients de détermination du graphique « Volume-Surface » sont supérieurs à 0,9 ce qui dénote une assez bonne concordance entre les courbes et les points. Pour l'autre graphique, nous avons des coefficients autour de 0,8 : la concordance diminue. Bien que les coefficients de détermination des courbes de puissance soient inférieurs à ceux des droites, nous avons choisi de les représenter parce qu'elles passent par l'origine (contrairement aux droites) et correspondent mieux à la réalité : à profondeur nulle, le volume et la surface sont nuls. Ces graphiques nous montrent donc que la profondeur d'une fosse est corrélée à sa surface et à son volume. Cette corrélation indique que les graviers jouent aussi un rôle et qu'à chaque profondeur de creusement, ils s'écroulent sur un certain volume avant d'être expulsés hors de la fosse. Nous aborderons ce point plus en détails en 2.5.2.5. L'existence de relations entre le volume, la surface et la profondeur relative nous indique qu'établir un critère pour une de ces trois variables revient à en établir un sur chacune d'entre elles (bien qu'avec une certaine erreur).

2.5.2.2.2 A débit variable

Bien que le cas 7 soit le meilleur, nous avons décidé de tester le cas 5 avec des débits de 20 l/s et 40 l/s. Ce cas 5 présente en effet une géométrie plus classique que celle du cas 7 ; il garde trois indentations de front comme pour le cas 7, et c'est de plus le meilleur de tous les cas parmi ceux qui ont leurs indentations placées au bord du canal. Le cas 2 a aussi été choisi pour tester des débits variables parce que ce cas représente le saut de ski classique (c'est-à-dire le plus couramment employé) et donne des caractéristiques très différentes du cas 5 pour un débit de 60 l/s. Le test de ces deux cas va nous permettre de comparer l'évolution de leurs performances avec une large gamme de débits. Nous

traçons des graphiques comparant ces deux cas pour les paramètres du volume, de la surface et de la profondeur relative (avec les intervalles de validité si possible). Nous y traçons de nouveau les courbes de tendance de puissances (les approximations par des droites ont été abandonnées parce qu'elles ne donnaient pas de résultats cohérents pour un débit nul auquel doivent être liés un volume, une surface et une profondeur nuls).

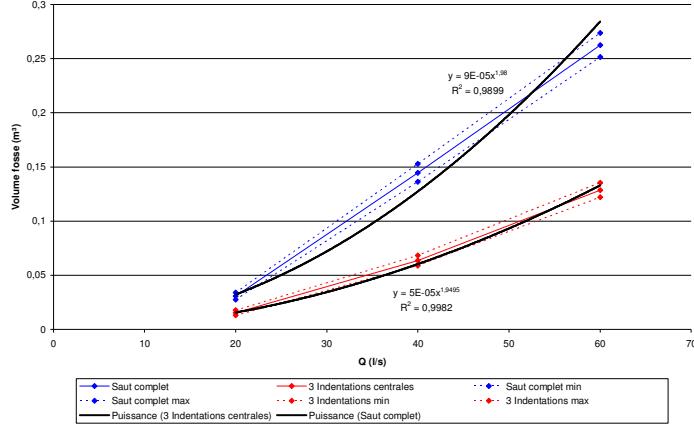


Figure 56 : "V-Q" pour cas 2 et 5

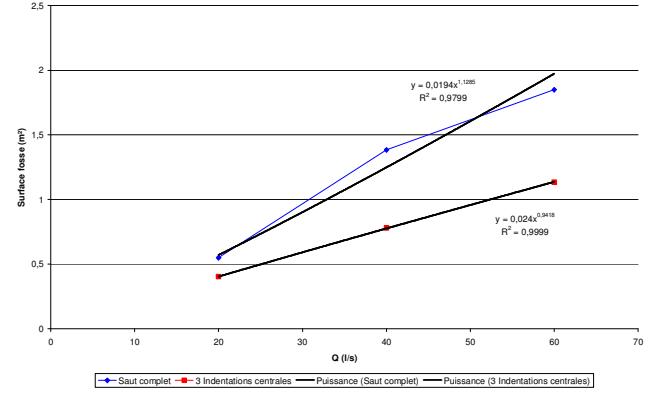


Figure 57 : "S-Q" pour cas 2 et 5

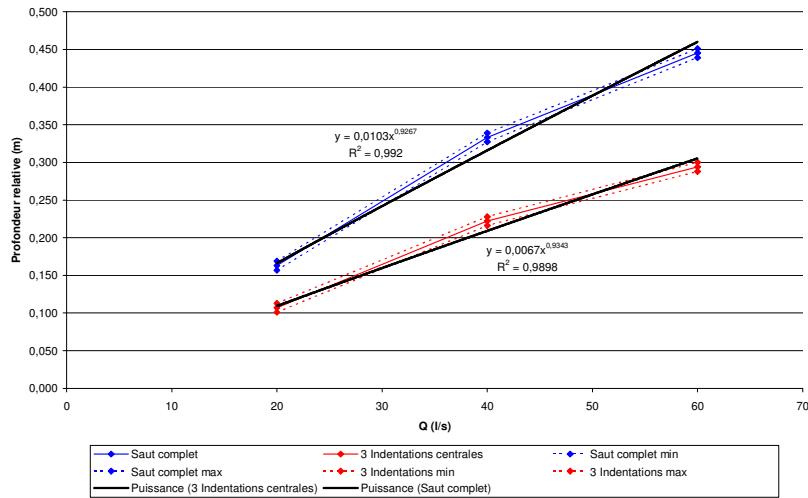


Figure 58 : "P_{rel}-Q" pour cas 2 et 5

Pour les trois paramètres analysés, les résultats du cas 2 (saut complet) sont toujours supérieurs à ceux du cas 5 (trois indentations centrales) pour tout débit comme pour tout intervalle de validité. Nous constatons aussi des évolutions différentes des paramètres entre les deux cas : les paramètres du cas 2 croissent plus rapidement que ceux du 5. Cela se voit graphiquement via les courbes de tendance qui s'écartent de plus en plus les unes des autres lorsque le débit augmente. Le volume et la profondeur du cas 2 pour un débit de 60 l/s devraient normalement être plus grands et les écarts entre les deux cas pour le volume et la profondeur devraient donc croître, ce qui ferait déplacer les courbes de tendance vers le haut. Ces graphiques nous montrent bien que le cas 5 est toujours plus intéressant que le cas 2 pour tout débit, le gain pour chaque paramètre étant à peu près constant pour

tout débit : il est de plus de 50 % pour le volume (les volumes du cas 5 valent un peu moins de 50 % de ceux du cas 2) et d'environ 35 % pour la surface et la profondeur.

2.5.2.3 Etude de $D_{intacte}$ et D_{max}

Nous étudions l'évolution de la distance intacte ($D_{intacte}$) entre le début de la fosse et le seuil ainsi que la distance du point le plus profond de la fosse au seuil (D_{max}). Pour chaque distance, nous étudions simultanément les cas à débit constant et à débit variable.

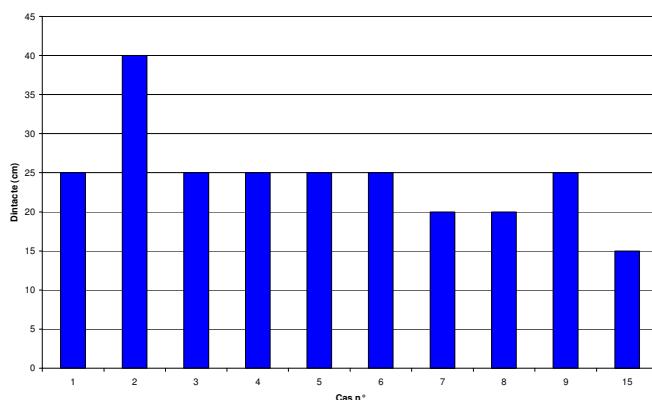


Figure 59 : Comparaison des $D_{intacte}$ à débit constant

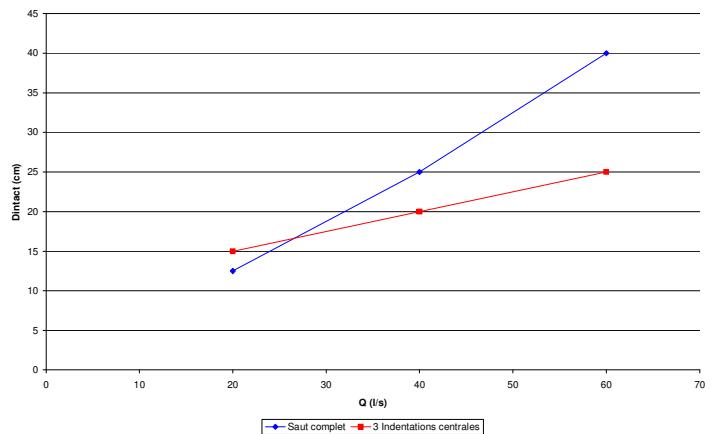


Figure 60 : Comparaison des $D_{intacte}$ à débit variable

Le cas 2 donne logiquement une distance intacte plus élevée que tous les autres cas puisqu'il projette le jet en entier le plus loin possible du canal. Les cas où toutes les indentations sont collées au bord du canal donnent une distance de 25 cm à l'exception du cas 15 où la faible distance est due sans doute à l'effet du regroupement de tous les jets vers le centre ainsi qu'à la chute latérale de l'eau des indentations (voir 2.5.5). La disposition des indentations sur la largeur semble donc n'avoir qu'une légère influence sur la « distance intacte ». Les cas 7 et 8 ont une distance de 20 cm. Cette différence par rapport aux autres cas provient du déplacement vers l'amont de certaines indentations, il est donc logique que les jets atterrissent plus tôt dans le bac et donnent une distance plus faible. A débit variable, nous constatons une évolution croissante linéaire pour les deux configurations. Le taux de croissance est plus fort pour le cas 2 ; cela est dû à l'action du saut complet qui envoie le jet de plus en plus loin en raison de l'accroissement du débit parce que l'angle de sortie est dirigé vers le haut. Tandis que dans le cas 5 une partie des jets passe sur les côtés des trois indentations et est dirigé vers le bas.

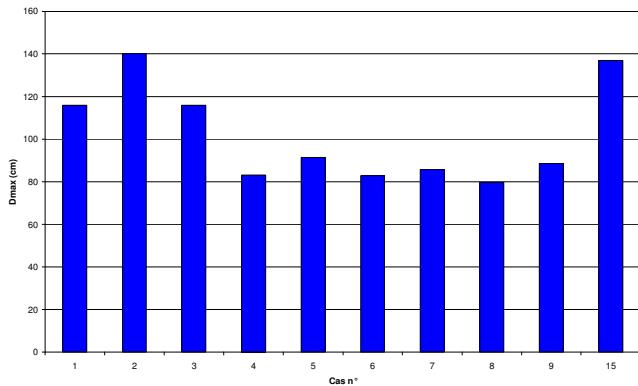


Figure 61 : Comparaison des D_{\max} à débit constant

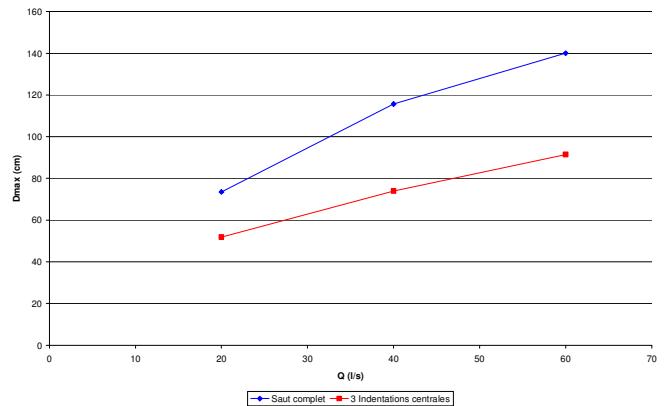


Figure 62 : Comparaison des D_{\max} à débit variable

La distance entre le fond de fosse et le seuil est minimale pour le cas 8 qui est en fait une variante des trois indentations centrales. Il est suivi de très près par les cas 4 à 9. Les distances des cas 7 et 8 sont inférieures au cas 5, dont ils dérivent, ce qui est logique vu le décalage vers l'amont d'une partie des indentations. La distance du cas 2 est plus grande de 25 cm que celle du cas 1, ce qui logique puisque le but du saut de ski est d'envoyer le jet le plus loin possible. La distance du cas 2 est la plus grande ce qui indique que diviser le jet avec des indentations conduit à rapprocher le point le plus profond des fosses vers le seuil. A débit variable, les distances augmentent linéairement avec le débit. Les distances des trois indentations sont toujours inférieures à celles du saut complet.

2.5.2.4 Etude de la forme des fosses

Nous étudions la forme des fosses sur base des figures obtenues avec le cadre de mesure laser et par l'analyse de leurs longueurs (L) et largeurs (l). Nous abordons d'abord les cas à débit constant et puis ceux à débit variable.

2.5.2.4.1 A débit constant

Nous rappelons d'abord les formes données aux différents cas en expliquant ces formes sur les images des fosses puis nous présentons les histogrammes des longueurs et largeurs et du rapport L/l des fosses. L'analyse est donc d'abord qualitative puis quantitative pour corroborer les formes choisies.

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15
Forme	ovale	trapézoïdale	ovale	ovale	ronde	ovale	ronde	ovale à ronde	ronde	ovale

Tableau 8 : Formes des fosses à débit constant

La forme ovale est apparue dans les cas 1, 3, 4, 6 et 15. Elle est caractérisée par un allongement assez prononcé de la fosse et par un rétrécissement de la largeur en début et en bout de fosse. Cette forme montre que dans ces cas les jets ont une grande tendance à creuser la fosse selon l'axe longitudinal de l'évacuateur de crue. La forme de ces ovales peut aussi nous indiquer quelle partie

du jet a le plus tendance à creuser : dans les cas 4 et 6, avec le bout de la fosse en pointe, le jet central joue un grand rôle et conserve une partie de sa puissance sur toute la longueur de la fosse. La largeur assez constante du cas 1 nous indique que le jet n'a pas tendance à s'élargir lors de son passage dans la fosse ce qui est sûrement dû au fait qu'il n'y a dans ce cas aucune indentation. La forme du cas 15 est très semblable à celle du cas 3. Cet évasement de la fosse vers l'aval relativement aux cas 3 et 15 tend à nous indiquer que ce sont surtout les jets centraux qui creusent la fosse et que leur rayon d'action a tendance à s'élargir vers l'aval.

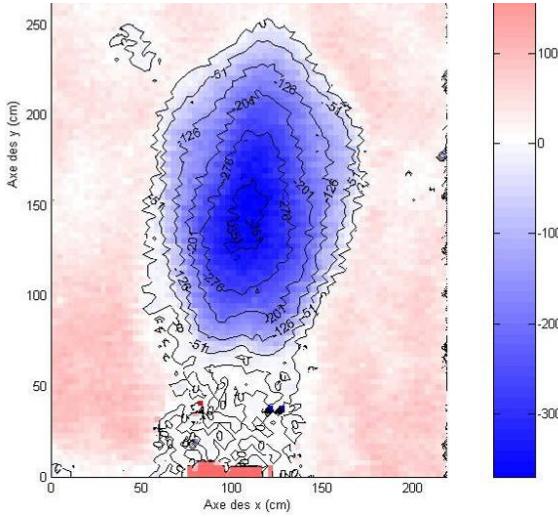


Figure 63 : Cas 1, forme ovale

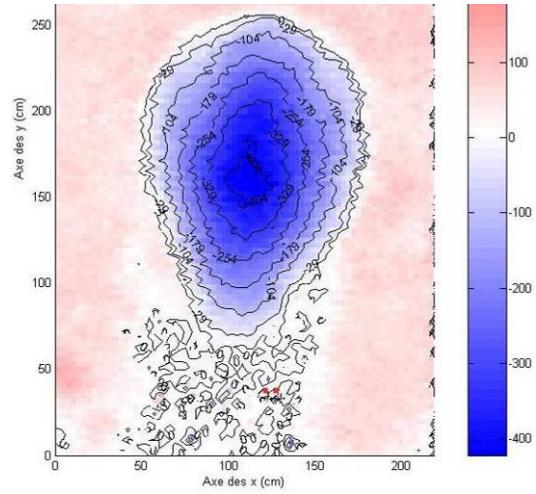


Figure 64 : Cas 3, forme ovale

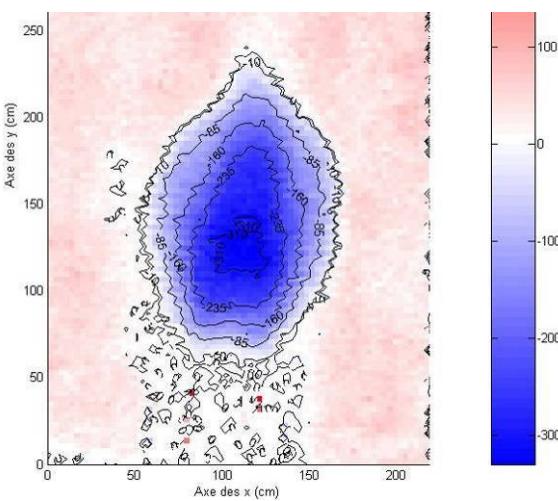


Figure 65 : Cas 4, forme ovale

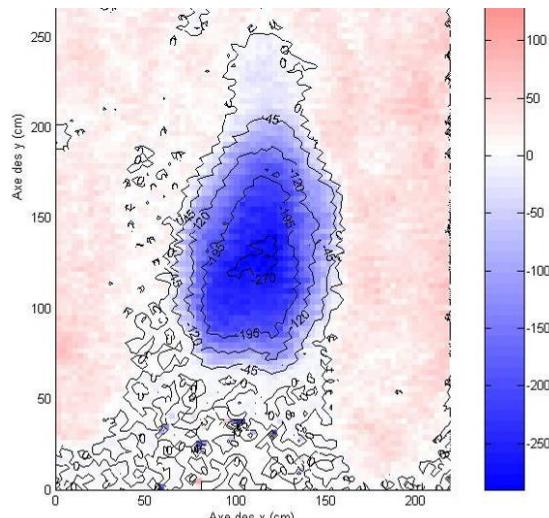


Figure 66 : Cas 6, forme ovale

La forme ronde a été attribuée aux cas 5, 7 et 9 dont les courbes de niveau peuvent être assimilées à la forme d'un cercle. Cette forme ronde met en évidence que l'écoulement n'a pas essayé de creuser la fosse selon une direction préférentielle. Je me limite à la présentation du cas 5 parce que les cas 7 et 9 lui sont tout à fait semblables. La forme « ovale à ronde » a été donnée au cas 8 parce

que sa fosse a une forme intermédiaire entre celles des cas 5 et 1 : on commence à sentir un creusement préférentiel selon l'axe longitudinal mais la forme ronde est encore présente vers le fond de la fosse.

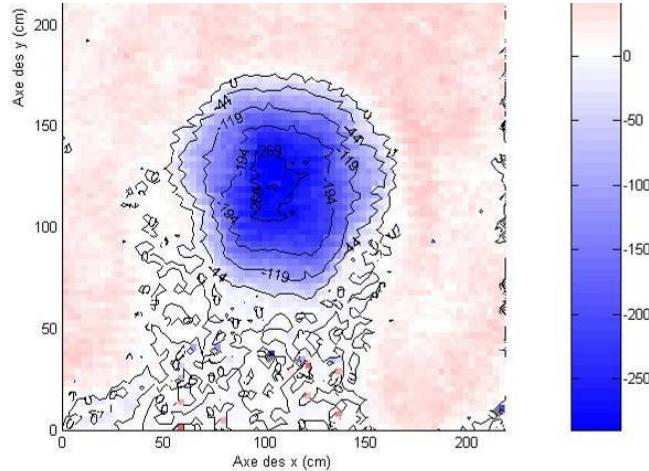


Figure 67 : Cas 5, forme ronde

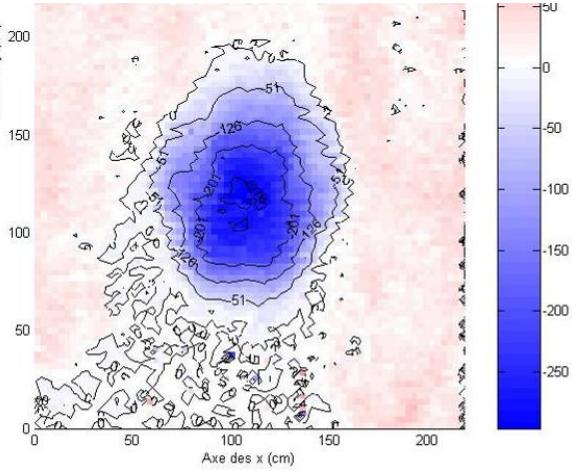


Figure 68 : Cas 8, forme « ovale à ronde »

La forme trapézoïdale a été attribuée au cas 2. Il présente une largeur croissante vers l'aval et des courbes de niveau amont et aval parallèles. Cela dénote un élargissement faible et progressif du rayon d'action du jet lorsqu'il est à l'intérieur de la fosse.

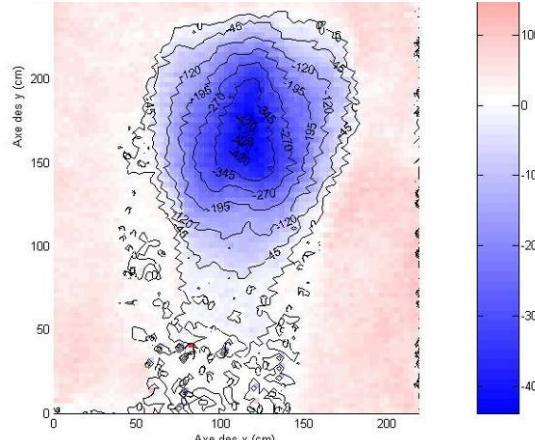


Figure 69 : Cas 2, forme trapézoïdale

Nous analysons maintenant les longueurs et largeurs de ces fosses. Comme indiqué dans la figure ci-dessous les longueurs des fosses sont assez variables. Elles sont les plus petites et presque égales dans les cas 5 et 7 et les plus grandes dans les cas 1, 2, 3, 4, 6 et 15. Entre ces deux extrêmes, nous avons les cas 8 et 9. Au niveau des largeurs, si l'on ne considère pas les cas 6 et 15, nous voyons qu'elles s'échelonnent entre 115 cm et 125 cm. La largeur du cas 6 est la plus faible et celle du cas 15 la plus élevée.

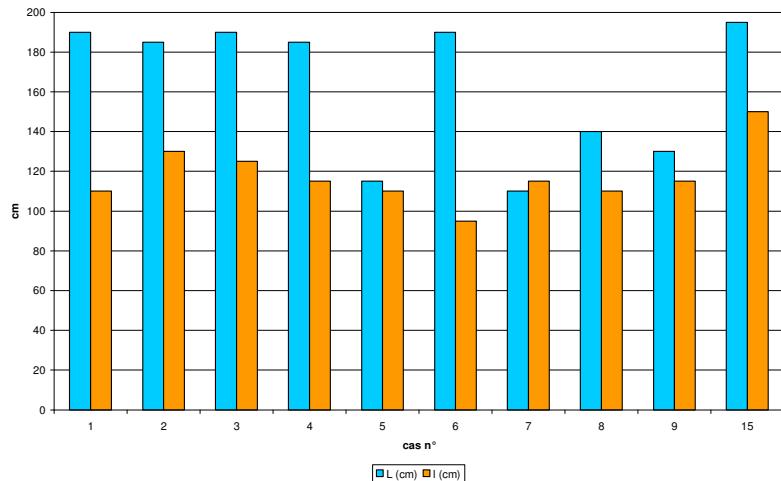


Figure 70 : Longueurs et largeurs des fosses à débit constant

Le rapport de la longueur sur la largeur donne une idée de l'étirement des fosses : un rapport presque égal à 1 correspond à une fosse ronde ou carrée tandis que lorsque ce rapport augmente, la forme tend vers le rectangle ou l'ovale. Les cas 5, 7 et 9 confirment la forme ronde obtenue précédemment. Le cas 8 est bien à la limite entre une fosse ronde et une fosse ovale. Les autres fosses (1 à 4 et 6) ont bien des rapports L/I correspondant aux formes étirées. Le rapport du cas 15 est plus faible que ceux des autres ovales parce qu'il a à une endroit une grande largeur.

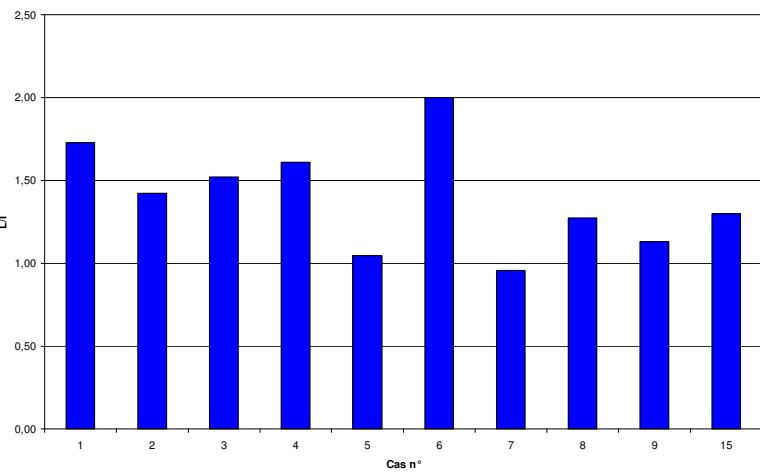


Figure 71 : Rapport L/I des fosses à débit constant

La représentation du rapport L/I en fonction de la profondeur maximale relative nous permettra peut-être d'établir un lien entre la forme et la profondeur d'une fosse :

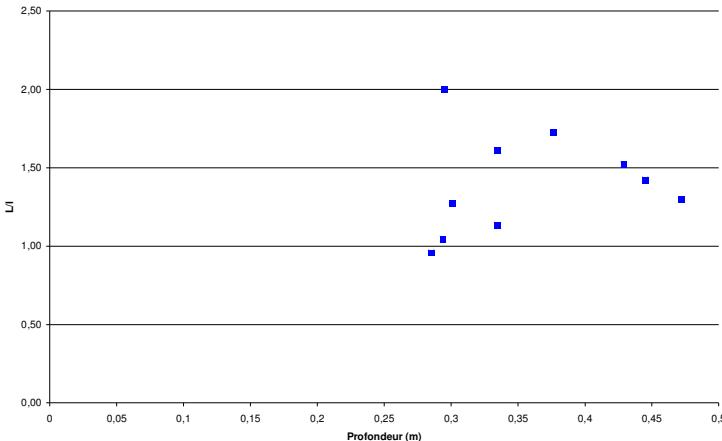


Figure 72 : "L/I"- "Profondeur relative" à débit constant

Nous constatons cependant sur ce graphique qu'il ne semble pas y avoir de corrélation entre ces deux paramètres. Nous en concluons donc que la disposition des indentations est le paramètre principal qui conditionne la forme de la fosse à débit constant.

2.5.2.4.2 A débit variable

Nous observons l'évolution de la forme des fosses et du rapport L/I pour différents débits. Lors du saut complet, la forme rectangulaire est conservée pour les trois débits testés tout en présentant cependant une légère déformation du rectangle lors de l'augmentation du débit.

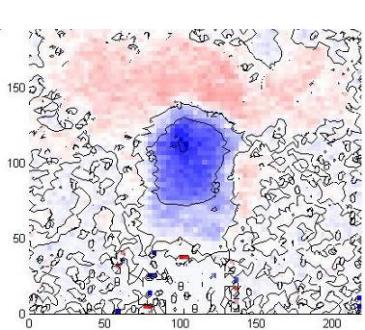


Figure 73 : Cas 11, forme rectangulaire

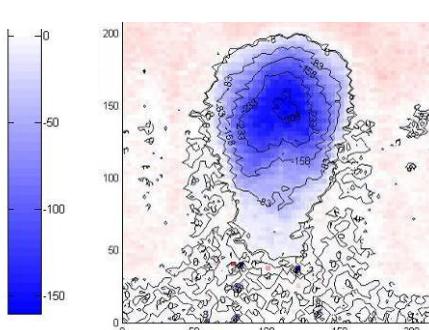


Figure 74 : Cas 12, forme rectangulaire

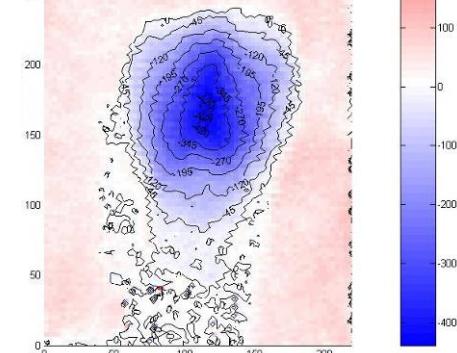


Figure 75 : Cas 2, forme rectangulaire

Pour les trois indentations centrales, nous passons progressivement d'une forme en « double-ovale » à une forme ronde. Cette division de la fosse en deux parties est flagrante dans le cas 13 et encore bien visible dans le cas 14. Cette forme nous indique que l'action des jets centraux est presque nulle et que ce sont les jets latéraux qui creusent la plus grande partie de la fosse ; c'est-à-dire que la dispersion d'énergie avant l'arrivée dans le bac à graviers est plus élevée pour les jets centraux.

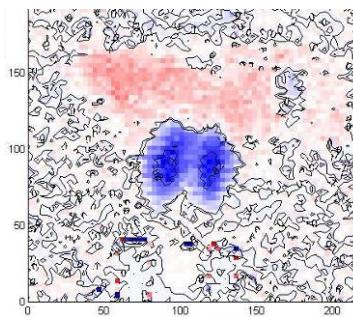


Figure 76 : Cas 13, forme "double-ovale"

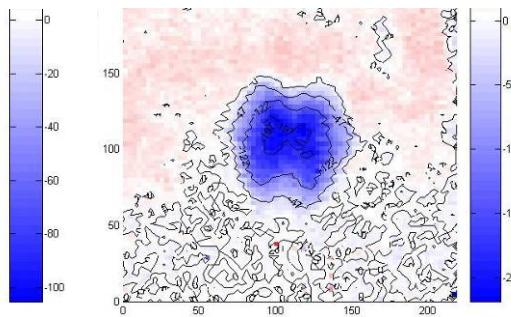


Figure 77 : Cas 14, forme "double-ovale"

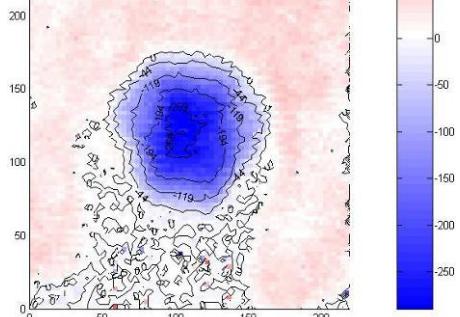


Figure 78 : Cas 14, forme ronde

La figure ci-dessous présente l'évolution du rapport L/I à débit variable : il reste proche de 1,5 pour le saut complet et de 1 pour les trois indentations. Cela confirme bien ce qui vient d'être dit sur l'« indépendance » des formes par rapport au débit.

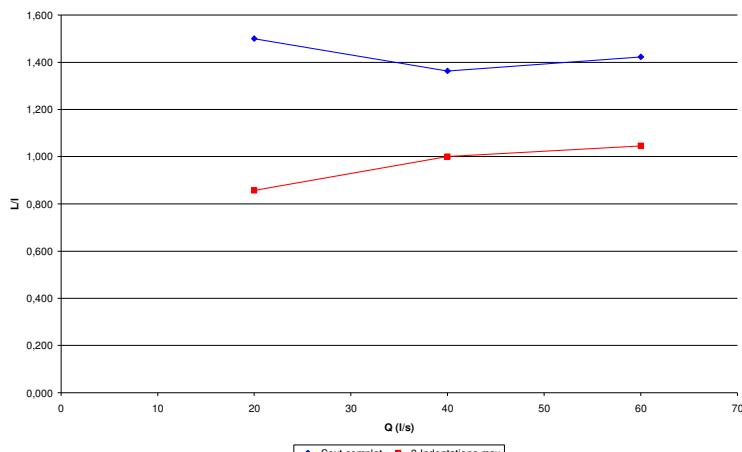


Figure 79 : Rapport L/I à débit variable

2.5.2.5 Etude des pentes des fosses

Les pentes amont, aval et latérales des fosses vont nous renseigner sur le mode de creusement en jeu dans chaque cas (voir 1.3.2.2). Pour rappel, la pente d'équilibre des graviers est d'environ 78 %. J'analyse d'abord les cas à débit constant puis ceux à débit variable.

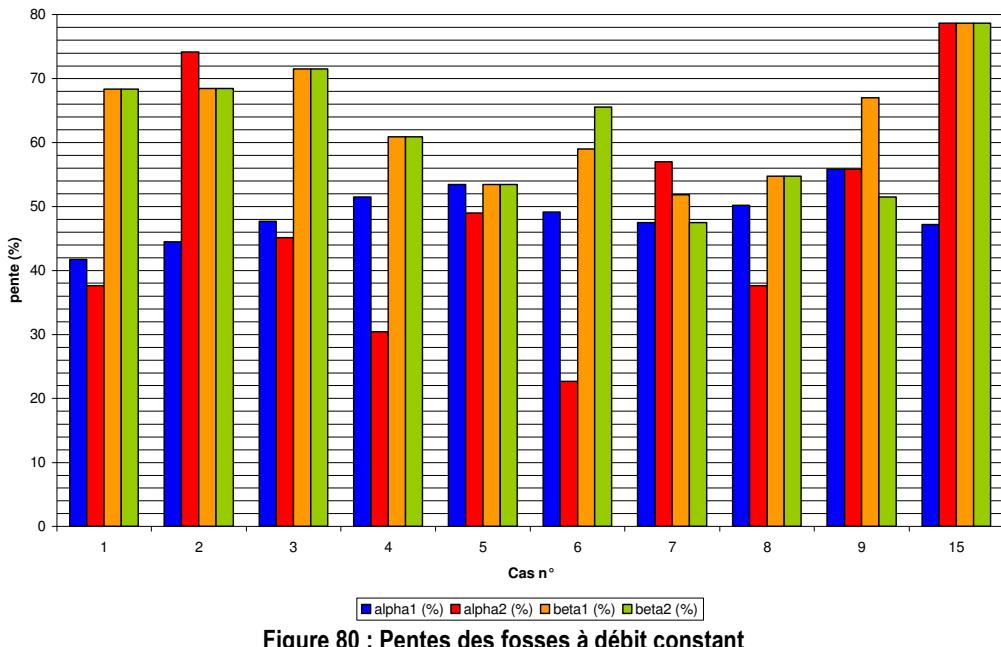


Figure 80 : Pentes des fosses à débit constant

Pour chaque cas, les pentes latérales (β_1 et β_2) sont à peu près égales entre elles. Cela montre que les fosses sont symétriques par rapport à l'axe longitudinal du canal. Les pentes latérales sont proches de la pente d'équilibre pour les cas 1, 2, 3 et 15 qui sont les cas qui présentent le plus grand volume excavé, cela indique que ces pentes résultent d'un écroulement et non d'un creusement direct des jets. Les pentes latérales des autres cas s'échelonnent entre 50 % et 65 %. Le fait qu'elles présentent des valeurs inférieures à la pente d'équilibre peut s'expliquer par la combinaison de deux facteurs : des jets qui creusent la fosse et provoquent des écroulements et d'autres qui perturbent les pentes latérales (comme les jets centraux des cas 5, 7, 8 et 9 par exemple).

Les valeurs des pentes α_1 et α_2 sont dans la grande majorité des cas inférieures à celles des pentes latérales. Cela dénote la plus grande influence des jets sur le façonnement de ces pentes. Les cas 1 (aucune indentation) et 2 (saut complet) obtiennent d'ailleurs les pentes α_1 les plus faibles ce qui indique que le creusement sur la partie amont de la fosse est dominé par l'angle d'impact du jet qui pour ces cas est constant sur toute la largeur. Pour les autres cas, où une partie des jets passe par les creux et une autre sur les indentations, α_1 est plus élevée ce qui veut dire que cette pente est influencée d'une part par des écroulements provenant du centre de la fosse et d'autre part par l'angle d'impact des jets. Les pentes α_2 des cas 2 et 15 résultent sans hésitation d'un écroulement. Ces pentes α_2 sont par contre assez faibles dans les cas 4 et 6 et ceci dénote l'influence directe des jets ; ces deux cas correspondent d'ailleurs à des formes ovales très pointues vers l'aval et les jets centraux semblent

conserver une grande énergie jusqu'à l'extrémité de la fosse. Toutes les autres pentes α_2 se situent entre ces extrêmes.

A débit variable, nous représentons l'évolution de α_1 , α_2 et d'une seule des pentes latérales (parce qu'elles sont égales entre elles).

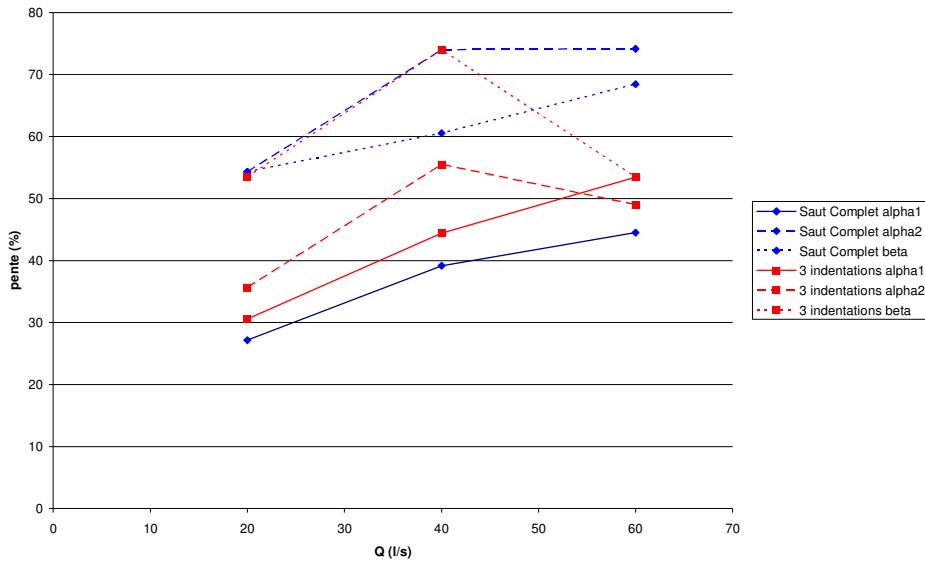


Figure 81 : Pentes de la fosse à débit variable

Nous constatons que les pentes α_1 croissent avec le débit. L'étude des autres pentes est plus problématique vu la croissance et décroissance de certaines. Dans le saut complet, les autres pentes sont plus grandes que α_1 et résultent plus d'un écroulement. Pour les trois indentations, α_2 et β chutent lors de l'augmentation du débit de 40 à 60 l/s ; cela est dû au passage d'une fosse de forme « double-ovale » à une fosse ronde. Dans la fosse « double-ovale » les largeurs l_1 et l_2 sont mesurées à partir des centres de chaque ovale ce qui donne des pentes plus grandes que dans le cas de la fosse ronde où les largeurs sont prises à partir du fond qui cette fois se trouve au centre.

2.5.2.6 Classement des fosses

Je réalise le classement des fosses à débit constant en combinant certains des paramètres analysés. Des points compris entre 0 (le pire résultat) et 10 (le meilleur résultat) sont attribués à chacun des paramètres proportionnellement à leur valeur. Selon le paramètre, le meilleur résultat pourra avoir la valeur la plus grande ou la plus faible. Les paramètres choisis sont les suivants :

- le volume de la fosse (la valeur minimale obtient 10 points parce qu'elle conduit aux dégâts les plus faibles) ;

- la longueur de la fosse (la valeur minimale obtient encore 10 points parce qu'elle conduit à une moindre emprise de la fosse sur la rivière) ;
- la largeur de la fosse (la valeur minimale obtient 10 points parce qu'elle risque moins d'abîmer les rives du cours d'eau) ;
- la distance intacte (la valeur maximale obtient 10 points parce qu'elle conduit à un risque plus faible de déplacement de la fosse vers l'amont).

Les surfaces et profondeurs ne sont pas reprises parce qu'elles varient en fonction du volume et qu'il serait donc redondant de les prendre en considération. La distance entre le fond de fosse et le seuil ainsi que la forme et les pentes des bords de la fosse n'ont pas non plus été retenues parce qu'il est difficile d'attribuer des bons ou mauvais points à ces paramètres.

Après avoir attribué les points à chaque paramètre, je les additionne en les pondérant pour atteindre une répartition des points entre 0 et 10. L'important paramètre qu'est le volume compte pour 60 %, la distance intacte pour 25 %, la largeur pour 10 % et la longueur pour 5 % (nous estimons que la longueur a une moins grande influence que la largeur). J'obtiens le tableau suivant avec les paramètres mesurés et les points associés :

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15
V (m ³)	0,277	0,263	0,322	0,217	0,129	0,158	0,114	0,129	0,184	0,391
Points	4,1	4,6	2,5	6,3	9,5	8,4	10,0	9,5	7,5	0,0
L (cm)	190	185	190	185	115	190	110	140	130	195
Points	0,6	1,2	0,6	1,2	9,4	0,6	10,0	6,5	7,6	0,0
I (cm)	110	130	125	115	110	95	115	110	115	150
Points	7,3	3,6	4,5	6,4	7,3	10,0	6,4	7,3	6,4	0,0
D intact (cm)	25	40	25	25	25	25	20	20	25	15
Points	4	10	4	4	4	4	2	2	4	0
Somme pondérée	4,2	5,7	3,0	5,5	7,9	7,1	7,6	7,2	6,5	0,0

Tableau 9 : Classement des fosses à débit constant

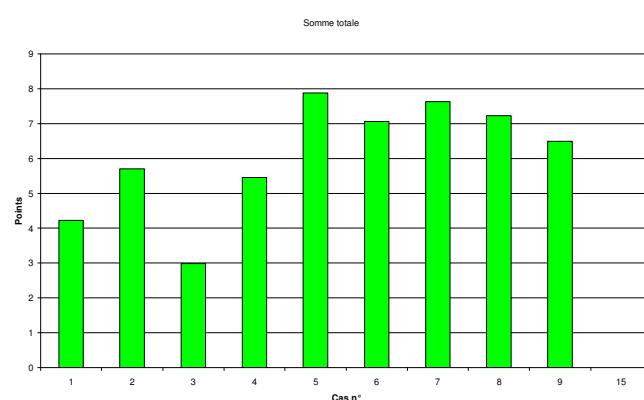


Figure 82 : Points totaux des fosses à débit constant

Le meilleur cas est le n°5, puis le suivant de près les cas 7 et 8, ces trois cas correspondent au placement des trois indentations au centre du canal. Viennent ensuite les cas 6 et 9 puis les cas 2 et 4. Le cas 1 (sans indentations) est meilleur que le cas 3 et le 15 (dont la valeur est nulle) ; il vaut donc parfois mieux ne rien construire plutôt que de disposer des indentations n'importe comment sur l'évacuateur de crue. Dans les cinq premiers cas nous constatons que quatre d'entre eux présentent un groupement d'indentations au milieu et qu'un seul fragmente le jet régulièrement sur la largeur (voir 2.5.5). Bien que le cas 6 donne de bons résultats, les cas 3 et 4 nous rappellent que la fragmentation régulière du jet n'est pas nécessairement le meilleur moyen pour avoir la meilleure fosse.

A chaque débit, si j'accorde 10 points au meilleur cas pour chacun des paramètres et puis que je pondère les paramètres comme précédemment, nous obtenons le tableau suivant :

Q	20		40		60	
Cas	11	13	12	14	2	5
V (m ³)	0,031	0,015	0,145	0,064	0,263	0,129
Points	0	10	0	10	0	10
L (cm)	90	60	150	95	185	115
Points	0	10	0	10	0	10
I (cm)	60	70	110	95	130	110
Points	10	0	0	10	0	10
D intact (cm)	12,5	15	25	20	40	25
Points	0	10	10	0	10	0
Somme pondérée	1	9	2,5	7,5	2,5	7,5

Tableau 10 : Points totaux des fosses à débit variable

Pour tous les débits, le cas des trois indentations offre de bien meilleurs résultats que ceux du saut complet. Les trois indentations placées au centre et au bord de l'évacuateur de crue offrent donc la meilleure solution aussi bien à débit constant qu'à débit variable.

En rassemblant toutes les analyses des essais à débit variable, je constate deux évolutions des paramètres :

- une conservation de la forme des fosses et du paramètre L/I avec la variation du débit ;
- une augmentation de toutes les autres caractéristiques (volume, surface, profondeur, distance intacte, position du fond de fosse, longueurs, largeurs) liée à la variation du débit.

J'en conclus à ce stade de mon étude que ce n'est pas le débit qui détermine la forme des fosses. Dès lors, l'étude des prochains paramètres servant à expliquer les différences de forme et des autres caractéristiques entre les différents cas se fera uniquement avec un débit constant de 60 l/s.

2.5.3 Dissipation d'énergie au sein du modèle réduit

Je représente les valeurs amont et aval des énergies pour chaque cas à débit constant.

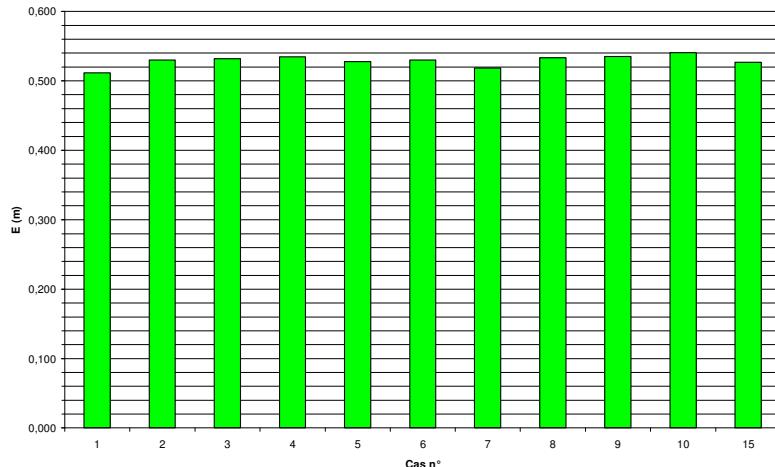


Figure 83 : Energie à l'amont du bac à graviers

L'énergie amont est comprise entre les valeurs assez proches de 0,51 m et 0,54 m. Elle devrait normalement être constante parce que le débit est de 60 l/s pour chaque essai et que les mesures de vitesse et de hauteur sont prises au même endroit. Ce n'est pas le cas parce qu'il peut y avoir une légère différence entre le débit affiché sur le boîtier de contrôle des pompes et le débit réel et parce que les mesures de hauteur et vitesse ne sont pas nécessairement exactes. Ces imprécisions ne m'empêchent cependant pas de considérer l'énergie amont globalement constante pour tous les cas.

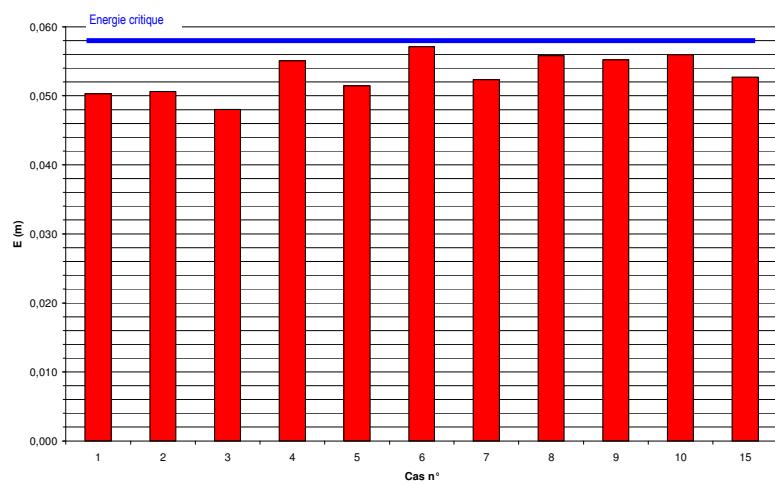


Figure 84 : Energie à l'aval du bac à graviers

Sur ce graphique de l'énergie aval, je rajoute le niveau d'énergie critique de l'écoulement sur le seuil. Ce niveau correspond à l'énergie minimale que possède un écoulement pour un débit donné ; il résulte de la combinaison de la hauteur critique de l'écoulement et de la vitesse qui y est associée. Pour le seuil aval dont la section rectangulaire (A) a une largeur l égale à 2,5 m, la hauteur critique vaut

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gl^2}} = \sqrt[3]{\frac{0,060^2}{9,81 \cdot 2,5^2}} = 0,039 \text{ m} . \text{ A cette hauteur critique correspond la vitesse critique}$$

$$\text{suivante : } v_{cr} = \frac{Q}{A} = \frac{0,060}{(2,5 \cdot 0,039)} = 0,62 \text{ m/s} . \text{ Sur le seuil aval, l'énergie critique vaut dès lors}$$

$$E_{cr} = h_{cr} + \frac{v_{cr}^2}{2g} = 0,058 \text{ m} . \text{ L'énergie aval est inférieure à l'énergie critique pour tous les cas et la}$$

différence par rapport à celle-ci va de 2 % à 17 %. De telles différences ne peuvent cette fois pas être totalement imputées à la précision des mesures. Vu la largeur de la section au niveau du seuil aval et la direction oblique de ce seuil par rapport à l'évacuateur de crue, il ne serait pas étonnant que la hauteur et la vitesse de l'eau ne soient pas uniformément distribuées le long de ce seuil. La simplification employée pour calculer les hauteurs et vitesses totales sur toute la section (pour rappel, nous avons simplement calculé la moyenne des résultats pris au tiers et aux deux tiers du seuil) n'est sans doute pas adéquate. Les énergies aval des cas 3 et 10 ne sont pas identiques ce qui dénote que les mesures d'énergie à l'aval de la fosse ne sont pas nécessairement reproductibles. Pour obtenir des valeurs plus précises, il faudrait prendre les mesures en de plus nombreux points sur le seuil. Cela n'a pas été réalisé parce que je sentais bien que j'étais au niveau de l'énergie critique sur le seuil du fait de la cascade créée à sa sortie. J'ai donc remplacé les énergies aval calculées par l'énergie critique du seuil.

Vu la constance de l'énergie à l'amont et à l'aval, nous obtenons des pertes d'énergie égales pour tous les cas. Et voilà pourquoi nous ne pouvons tirer aucune conclusion relative à la dissipation d'énergie au passage des indentations ou dans la fosse. La perte d'énergie entre les bornes du modèle réduit ne nous aide donc pas à expliquer la forme et les paramètres des fosses mesurés avec le cadre laser.

2.5.4 Répartition du débit sur les indentations

Le calcul de la répartition du débit sur la largeur juste au bout de l'évacuateur de crue va nous aider à mieux comprendre les différences entre les fosses. Ce calcul a été fait pour tous les essais à 60 l/s hormis pour les cas 7 et 8 par faute de temps ; il est cependant possible que, leur géométrie étant très proche de celle du cas 5, les débits de ces cas soient semblables à ceux du cas 5. Nous analysons d'abord l'écoulement pour le cas 1 (sans indentations), les hauteurs d'eau ayant été mesurées sur toute la largeur et les vitesses juste au milieu de la hauteur d'eau. Les intervalles de validité autour des mesures sont représentés sur la figure par les crochets noirs : l'intervalle pour les hauteurs vaut 0,36 mm (c'est-à-dire deux fois le degré de précision des sondes) et les vitesses ont un intervalle de confiance à 95 %¹⁴ autour de la moyenne des temps mesurés et vaut $1,96\sigma$ où σ est l'écart-type des mesures (en faisant l'hypothèse d'une distribution gaussienne¹⁵ des mesures autour de la moyenne).

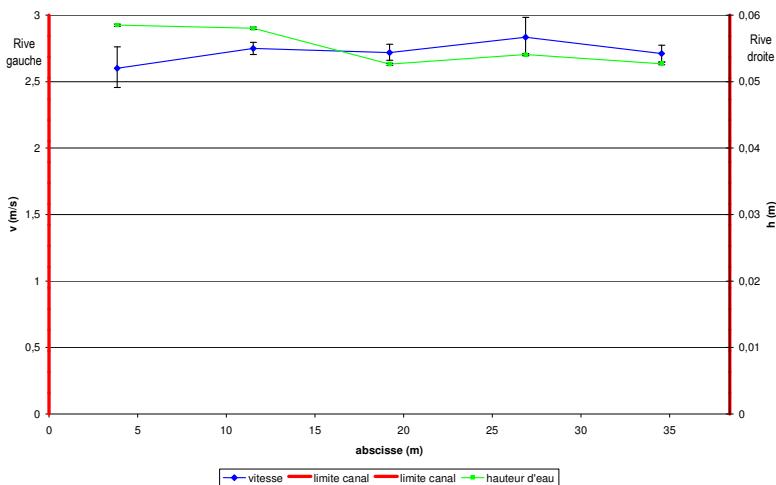


Figure 85 : Vitesses et hauteurs d'eau dans le canal pour le cas 1

Nous constatons que les hauteurs d'eau sont variables sur la largeur du canal. Vu les larges intervalles autour des vitesses, celles-ci pourraient aussi bien être constantes que variables pour ce cas 1. Ces variations de hauteur et de vitesse peuvent être dues aux ondes transversales qui se développent à partir de l'extrémité aval de la pile centrale de l'évacuateur de crue. Ces ondes se propagent ensuite dans tout le canal et se répercutent sur les parois.

¹⁴ Un intervalle de confiance à 95 % signifie que nous sommes sûrs que cet intervalle regroupe au minimum 95 % des mesures.

¹⁵ Cette hypothèse, bien que difficilement vérifiable vu le peu de mesures de vitesse, a été choisie parce qu'elle semble être la moins restrictive.

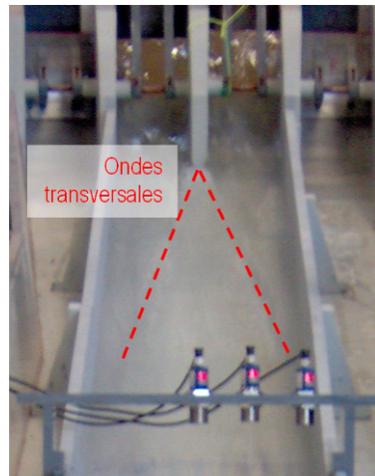


Figure 86 : Ondes transversales dans le canal d'évacuation

Comme nous ne savons pas déterminer précisément les vitesses, nous calculons les débits avec des intervalles de validité. Sur la figure suivante, nous avons disposé au-dessus des indentations ou des creux tous les débits (en l/s) que nous avons pu calculer. A chaque fois, il y a trois valeurs avec de haut en bas : l'intervalle supérieur de validité, la moyenne et l'intervalle inférieur. A droite de chaque schéma, il y a aussi trois valeurs de débit total (Q_{tot}). Les débits en bleu sont ceux pour lesquels il manque des données, les valeurs à ces endroits ont donc été égalées au creux ou à l'indentation symétrique sur l'autre demi-largeur de canal.

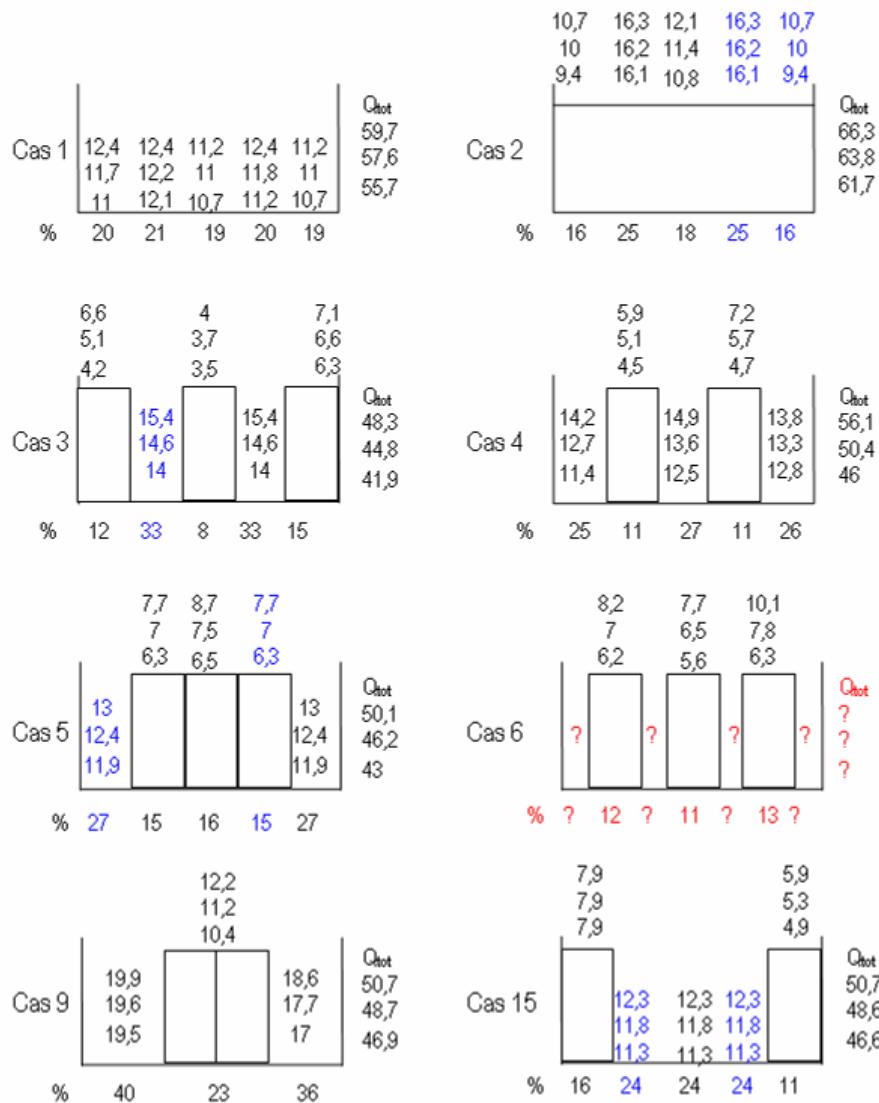


Figure 87 : Répartition du débit sur les indentations

Les intervalles de validité ne sont finalement pas très étendus autour de la position moyenne et permettent bien d'affirmer que le débit varie entre un creux et une indentation. Nous constatons qu'à l'exception des cas 1 et 2, aucun des débits totaux ne s'approche du débit réel de 60 l/s. Cela peut s'expliquer par une simplification trop grande du calcul du débit sur chaque tronçon de la largeur (la hauteur et la vitesse n'y sont pas nécessairement constantes) ou par la chute sur les côtés d'une partie de l'eau passant sur les indentations (cette eau ne peut pas être mesurée par les sondes des creux parce qu'elle continue directement vers l'aval tout en tombant des indentations). Nous calculons le pourcentage du débit total passant dans chaque creux ou indentation en nous basant sur les valeurs calculées de Q_{tot} tout en sachant que le pourcentage dans les creux est potentiellement plus grand.

Le cas 1 montre que le débit est finalement assez bien réparti sur la largeur du canal avec des valeurs autour de 11-12 l/s pour chaque cinquième de canal. Le cas 2 montre des différences notables

sur la largeur avec les 2^{ème} et 4^{ème} parties du saut de ski qui regroupent 50 % du débit. Les cas avec indentations et creux présentent une grande variation dans la répartition du débit. Il ne passe pas plus de 8 à 16 % du débit par indentation alors qu'il devrait être de 20 % si le débit se répartissait uniformément. Un creux d'un cinquième de la largeur fait par contre passer entre 24 et 33 % du débit total, ce qui est largement supérieur aux 20 % prévus. Le cas 3 donne 66 % du débit dans les creux ; cet important pourcentage explique en partie la grande largeur de la fosse (voir 2.5.2.4). Dans le cas 4 78 % du débit passe par les trois creux et le reste se répartit sur les indentations ; le grand débit dans le creux central permet d'expliquer la forme en pointe de la fosse constatée en 2.5.2.4. Le cas 5 envoie 46 % du débit sur les indentations centrales et le reste sur les côtés ; cette répartition ne permet pas encore d'expliquer la forme ronde de la fosse. Le cas 6 est bien particulier parce que nous n'avons pu mesurer les hauteurs et vitesses dans les creux du fait de leur trop petite largeur ; pour cette raison nous avons estimé le pourcentage de l'eau sur chaque indentation en supposant un débit de 60 l/s et avons trouvé une répartition de 11 à 13 % du débit sur les indentations. Ces nombres paraissent valables si nous les comparons aux débits sur les indentations des autres cas. 64 % du débit reste dans les creux mais celui-ci est divisé en quatre jets. Le cas 9 est un peu différent du cas 5 : le pourcentage de débit sur chaque indentation y est plus faible parce qu'il n'a que deux indentations d'où l'eau tombe plus facilement et cela génère un débit beaucoup plus grand dans les creux (76 %) que dans le cas 5 (54 %). Le cas 15 concentre en son centre un jet unique qui regroupe 72 % du débit et ceci explique en partie la très grande fosse mesurée dans ce cas.

2.5.5 Etude des jets

L'évaluation de la zone d'impact se fait sur base des photos latérales (pour la longueur de la zone d'impact ZI) et du dessus (pour la largeur de cette zone). Sur les photos en vue du dessus, nous traçons le prolongement des coins inférieurs de la section du canal pour contrer l'effet de perspective et mieux comparer les largeurs des jets à celle du canal. Pour qualifier l'interaction entre les jets et la dispersion spatiale, nous utilisons uniquement les photos avec vue du dessus.

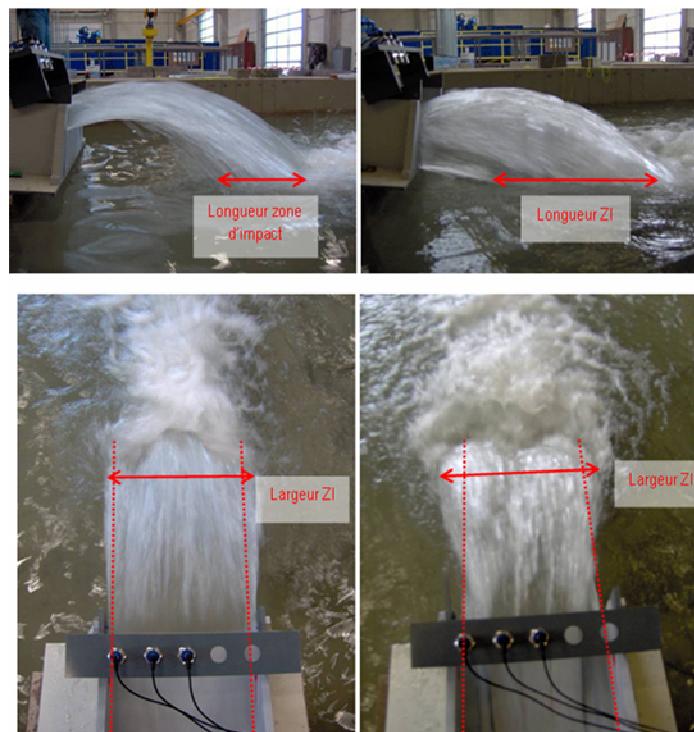


Figure 88 : Calcul des longueurs et largeurs de la zone d'impact (cas 2 à gauche et 5 à droite)

La première chose à signaler est que l'aération des jets est très faible. La longueur de la zone d'impact varie fortement entre les cas 2 et 5. La longueur pour le saut complet vaut environ la moitié de celle du cas 5 parce que tout le jet décolle de la même position. Tous les cas avec creux et indentations ont une longueur équivalente au cas 5 (même pour les cas 7 et 8 où des dents sont disposées plus en amont du canal parce que le premier jet à toucher la fosse est toujours celui des creux). La longueur d'impact du cas 1 (canal vierge) est quant à elle équivalente à celle du cas 2. Nous constatons aussi des différences entre les largeurs d'impact de ces deux cas. La largeur du cas 2 est presque égale à celle du canal tandis que la largeur du cas 5 est visiblement plus grande. Nous ne présentons pas les vues du cas 1 parce qu'elles sont très semblables à celles du cas 2 (l'interaction et la dispersion y sont nulles et la largeur de la zone d'impact est égale à celle du canal).

A partir des deux vues de la figure antérieure sur le dessus des jets, nous commençons notre analyse de l'interaction entre les jets et celle de leur diffusion spatiale. Le cas 2 ne présente ni interaction ni diffusion parce qu'il éjecte l'eau en un seul jet qui file vers la fosse sans s'étendre latéralement. Le cas 5 est nettement plus intéressant : l'eau passant par les indentations est dispersée latéralement à la sortie du canal et il n'y a pas d'interaction entre les jets parce que l'eau centrale n'en forme qu'un.

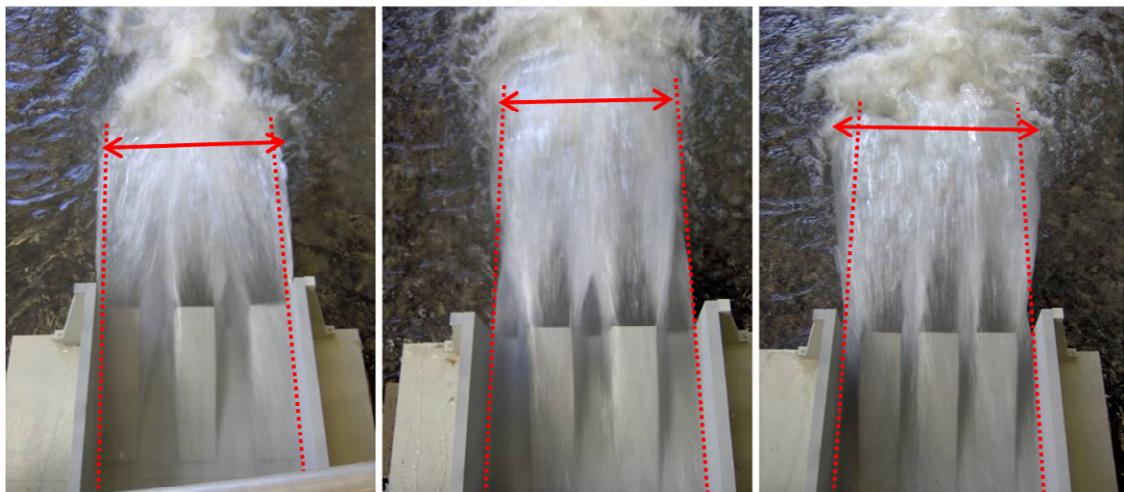


Figure 89 : Jets des cas 3 (gauche), 4 (centre) et 6 (droite)

Les cas 3 et 4 présentent une forte interaction entre les jets des indentations à la sortie du canal et leur largeur totale à l'impact est égale à celle du canal. Il est aussi très clair qu'une indentation solitaire non-adjacente à une paroi du canal tend à disperser le jet sur chaque partie latérale. Avec le cas 6, les jets se rencontrent encore plus rapidement que dans les cas 3 et 4 parce que les écarts entre les indentations sont plus faibles ce qui conduit à une interaction plus forte. La largeur de la zone d'impact est quant à elle supérieure à celle du canal parce que les indentations externes peuvent envoyer les jets vers la gauche et la droite (ce qui n'est pas possible dans le cas 3). La dispersion spatiale de chaque jet est moyenne parce que les indentations sont séparées les unes des autres contrairement au cas 5 où il y a trois indentations jointes qui provoquent une grande dispersion du jet à l'impact.

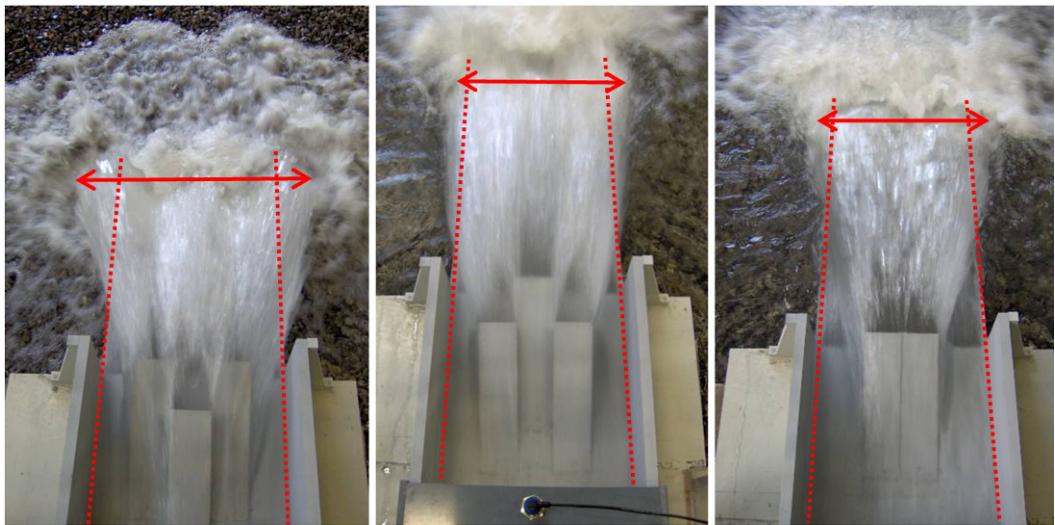


Figure 90 : Jets des cas 7 (gauche), 8 (centre) et 9 (droite)

Parmi tous les cas, le 7 a la plus grande largeur d'impact ; elle est plus grande que celle du cas 5 parce que le jet central décolle avant les deux autres et tend à les dévier vers l'extérieur. Les largeurs des cas 8 et 9 sont un petit peu plus grandes que celle du canal. La disposition des indentations du cas 8 est juste l'inverse de celle du cas 7 et conduit à des largeurs différentes, ce qui réaffirme la nécessité de « bien penser » aux endroits pour mettre les indentations. L'interaction entre jets est moyenne pour les cas 7 et 8 et nulle pour le n°9. Quant à la dispersion spatiale, elle est moyenne pour les n°7 et 8 et grande pour le cas 9.

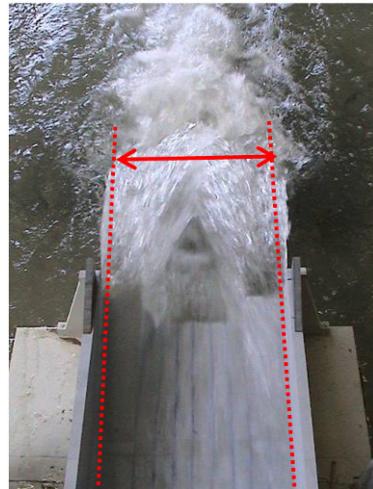


Figure 91 : Jets du cas 15

La largeur du cas 15 égale celle du canal, la dispersion des jets ainsi que leur interaction sont moyennes. Une grande partie de l'eau des indentations est renvoyée au centre ce qui conduit sans doute à aggraver le creusement de la fosse.

En résumé, nous obtenons le tableau suivant (2x signifie deux fois plus grand que 1x, l est la largeur du canal, S est la surface minimale d'impact et le nombre de symbole > devant « l » ou « S » donne des largeurs et des surfaces croissantes par rapport à l et S) :

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15
Interaction entre jets	nulle	nulle	grande	grande	nulle	très grande	moyenne	moyenne	nulle	moyenne
Dispersion spatiale	nulle	nulle	moyenne	moyenne	grande	moyenne	moyenne	moyenne	grande	moyenne
Longueur zone d'impact	1x	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x
Largeur zone d'impact					>>	>	>>>	>	>	
Surface zone d'impact	S	S	2S	2S	>>2S	>2S	>>>2S	>2S	>2S	2S

Tableau 11 : Paramètres des jets à débit constant

La zone d'impact totale est la plus grande dans le cas 7 et puis le 5, viennent ensuite les 6, 8 et 9. Les cas 3, 4 et 15 ont une zone équivalente au double de celle des cas 1 et 2.

2.5.6 Etude du champ de pression sous les jets

Avant toute chose, il convient d'étudier la reproductibilité des essais de pression pour valider l'approche choisie pour l'étude des pressions. La symétrie du champ de pression par rapport à l'axe longitudinal du canal est ensuite analysée avant de passer à l'étude des résultats des cas 1 à 6, du cas 9 et du 15. Il est à noter que la distribution de tous les résultats de pression a été étudiée et qu'elle conduit à une distribution normale des mesures.

2.5.6.1 *De la reproductibilité des essais et de la symétrie du champ de pression*

Le cas 15 est testé deux fois (cas A et B) avec les sondes placées selon le schéma suivant et la sonde 2 à la coordonnée $x = 120$ cm du bac dans le prolongement de l'axe de symétrie du canal :

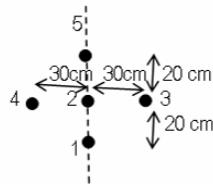


Figure 92 : Emplacement des sondes pour le test de symétrie

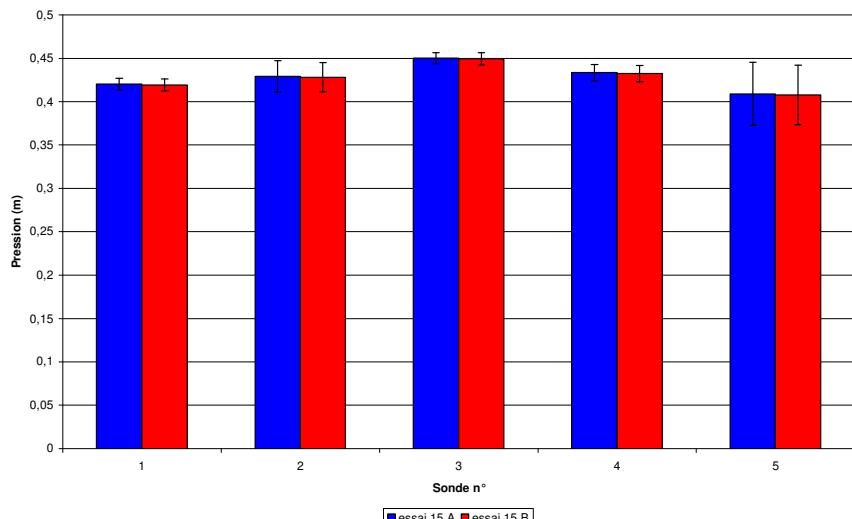


Figure 93 : Double essai de pression pour le cas 15

Les essais sont reproductibles : les moyennes et les écarts-types sont égaux ou presque d'un essai à l'autre. La symétrie est loin d'être acquise avec ces essais : la moyenne de la sonde 3 est supérieure de 2 cm à celle de la sonde 4 tandis que son intervalle contenant 95,5 % des mesures vaut les deux tiers de celui de la sonde 4. Comme la symétrie des débits n'est pas vérifiée pour le cas 15 (voir 2.5.4), il n'est pas étonnant que celle des pressions ne le soit pas non plus.

2.5.6.2 Etude des pressions

Bien que le champ de pression ne soit pas symétrique pour le cas 15, les essais de pression ont quand même été menés avec la disposition prévue en 2.3.5.1.2 (rappelée ci-dessous) parce qu'il semblait intéressant de concentrer les sondes sur une petite zone pour avoir plus d'informations.

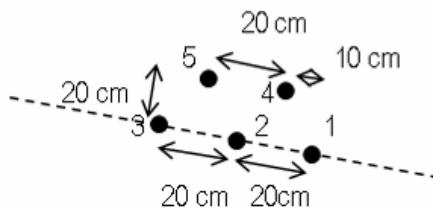


Figure 94 : Disposition des sondes de pression

Quant à la position des sondes, il était prévu au départ de placer la sonde centrale aux coordonnées (x,y,z) du fond de la fosse pour saisir au mieux les variations de pression qui se produisent à cet endroit où le creusement est maximal. Cependant, vu la distance de 19 cm entre la sonde et le fond du bac à graviers, il n'a jamais été possible de mesurer les pressions dans le fond des fosses parce qu'elles sont trop profondes avec un débit de 60 l/s. Les différences de hauteur entre les sondes et le fond réel de la fosse sont données dans le tableau ci-dessous. Dans le meilleur des cas, les sondes ne sont qu'à 2,6 cm de la position voulue. Au pire, elles sont distantes de 19 cm tout en sachant que le fond aurait encore pu être plus bas dans les cas 2 et 15 (dès lors la distance aurait été plus grande).

Cas	1	2	3	4	5	6	9	15
Distance (cm)	13,2	19	16,5	7,1	3,1	2,6	7	19

Tableau 12 : Distances entre les sondes de pression et le fond des fosses

J'ai cependant pu placer les sondes aux x et y choisis. Le cas 2 fut testé en premier avec x = 170 cm et j'obtins le graphique suivant :

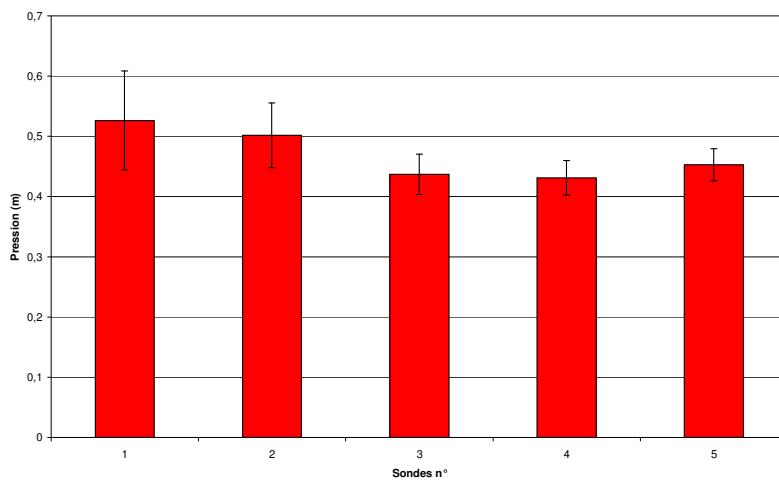


Figure 95 : Moyenne et intervalles à 95,5% des pressions, cas 2, x = 170 cm

La moyenne et l'intervalle correspondant augmentent de la sonde 3 vers la 1. Il a alors été décidé de déplacer les sondes vers l'amont pour essayer d'obtenir le plus grand intervalle au niveau de la sonde 2 et de mieux cerner les variations de pression avec les autres sondes. Le dispositif fut déplacé en $x = 150$ cm et j'eus la figure suivante :

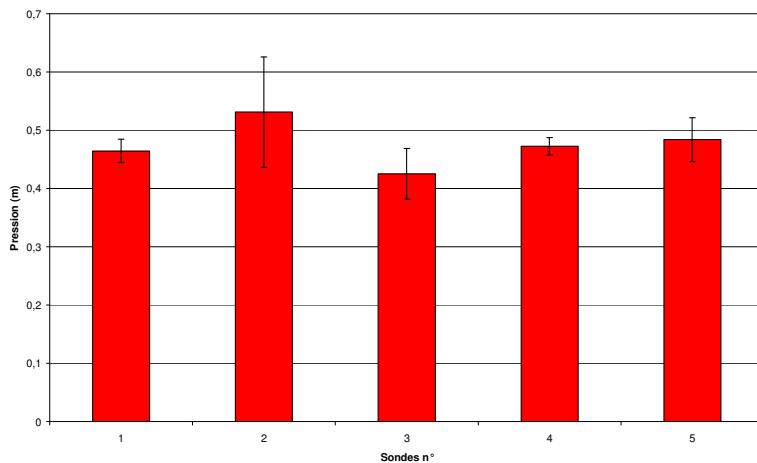


Figure 96 : Moyenne et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2, $x = 150$ cm

Le plus grand intervalle est relevé à la sonde 2 et les sondes 1 et 3 ont une pression moyenne et des intervalles plus petits que la 2. Quant aux sondes latérales (4 et 5), leur analyse n'est pas facile parce qu'elles ont des valeurs de moyenne comprises entre celles des sondes 1 et 2 et des écart-types plus petits que celui de la sonde 3. Tous les essais ont ensuite été menés en cherchant un intervalle maximum pour la sonde 2. Ci-dessous, je présente les coordonnées x des fonds de fosses et des endroits où la sonde 2 a été placée.

Cas	1	2	3	4	5	6	9	15
Coordonnée x des fonds de fosse (cm)	140	170	160	130	130	130	130	150
Coordonnée x à laquelle est placée la sonde 2 (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
Comparatif	en aval	en amont	en amont	en aval	en aval	en aval	en aval	au bon endroit

Tableau 13 : Emplacement de la sonde de pression n°2 pour chaque cas

J'obtins ce graphique qui résume tous les essais sonde par sonde :

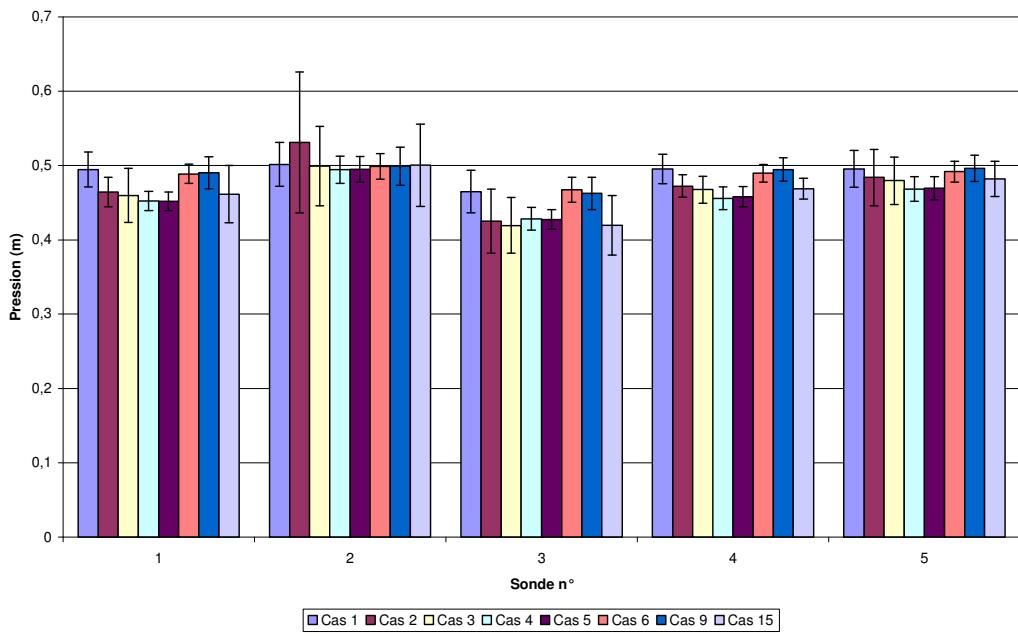


Figure 97 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 1 à 6, 9 et 15

La moyenne des pressions et l'intervalle à 95,5 % sont à chaque fois les plus grands pour la sonde 2. Que dire de plus ? En effet, je constate que la pression oscille très rapidement autour de la moyenne (voir 2.3.5.2) selon une loi normale et que c'est sans doute ce phénomène qui est à la base de l'érosion (voir 1.3.2.2). Je vois aussi que la moyenne des pressions et l'étendue des intervalles de pression changent d'un cas à l'autre et que la plus ou moins grande érosion dépend de ces facteurs. Est-il cependant licite de comparer tous ces résultats entre eux ? Au départ, je voulais comparer les résultats de pression venant d'essais où la sonde 2 aurait été à chaque fois à une position (x,y,z) différente. Finalement, je me retrouve avec des mesures qui viennent toutes de la même position (x,y,z) = (150,y,19) où y n'est pas connu parce qu'on utilise un fil tendu le long de l'axe de symétrie du canal pour se positionner selon y. Sur le schéma ci-dessous, je constate que la position choisie au final ne correspond jamais au même endroit des fosses : soit elle est trop en amont par rapport au fond de la fosse (cas vert) soit trop en aval (cas rouge) soit au bon endroit selon x mais, de toute façon, pas à la bonne hauteur z (cas bleu). Il devient donc presque impossible de comparer tous ces résultats entre eux parce qu'ils ne représentent pas les mêmes phénomènes

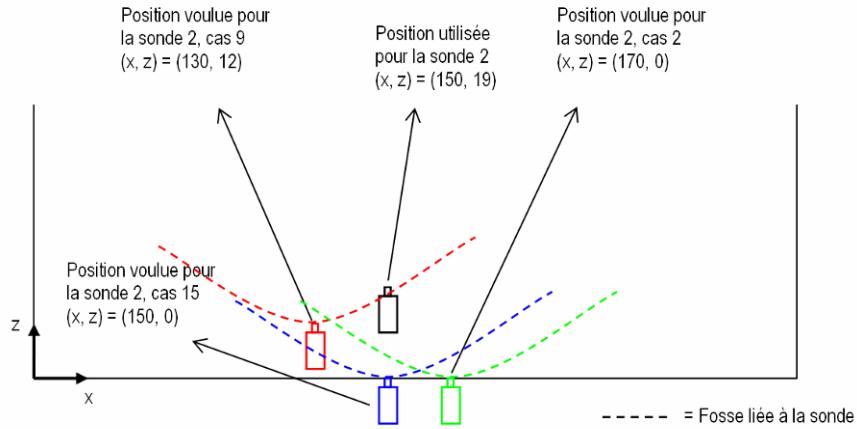


Figure 98 : Schéma de l'emplacement réel des sondes par rapport à ceux voulus

Il est possible cependant de comparer certains essais deux à deux et, bien que les sondes ne soient pas au fond de la fosse, ceux-ci donnent des informations sur la même zone de la fosse. Il en est ainsi pour les cas 2 et 3 (sonde 2 réelle en amont et à 16,5 cm et 19 cm des hauteurs voulues), les cas 5 et 6 (sonde 2 réelle en aval et à seulement 3 cm des hauteurs voulues) et les cas 4 et 9 (sonde 2 réelle en aval et à 7 cm des hauteurs voulues). Les cas 2 et 3 sont dans la configuration de la fosse verte ci-dessus ; les sondes mesurent donc le phénomène d'érosion lorsque la fosse n'a pas encore atteint sa profondeur maximale parce que les jets sont obliques et vont de l'amont vers l'aval. Les cas 4, 5, 6 et 9 sont dans le cas de la fosse rouge ci-dessus, les sondes mesurent dès lors des variations à l'aval du point le plus profond et qui ne représentent pas nécessairement le phénomène d'érosion par pression dynamique parce que les graviers, une fois décrochés, sont emportés par le courant vers l'aval.

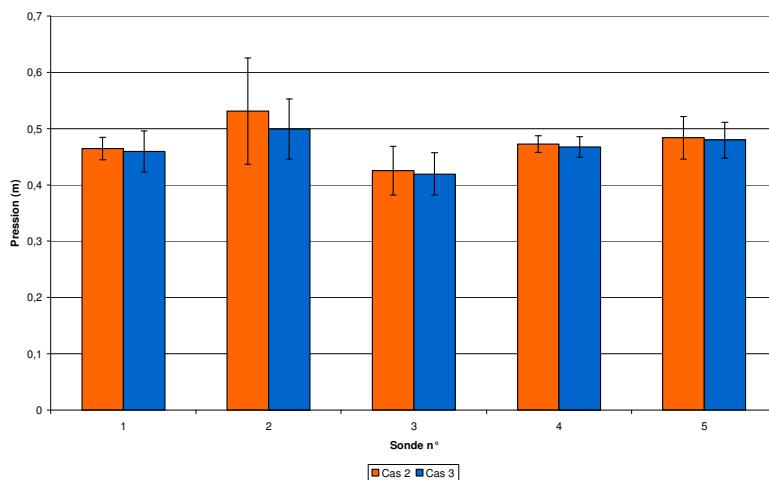


Figure 99 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 2 et 3

Les moyennes de chaque sonde sont très semblables d'un cas à l'autre. Le cas 2 présente les plus grands intervalles pour les sondes 2, 3 et 5 et le cas 1 pour les sondes 1 et 4. Il est donc difficile de

déterminer quel est le cas le plus turbulent. Lorsque je compare les volumes excavés, je constate que le volume du cas 3 est plus grand que celui du cas 2. Le volume de ce cas 2 pourrait cependant être plus grand encore vu que le fond du bac a été atteint. Au final, je ne sais pas quel cas devrait avoir dans la réalité le volume le plus grand et produirait le plus de turbulence dans les pressions.

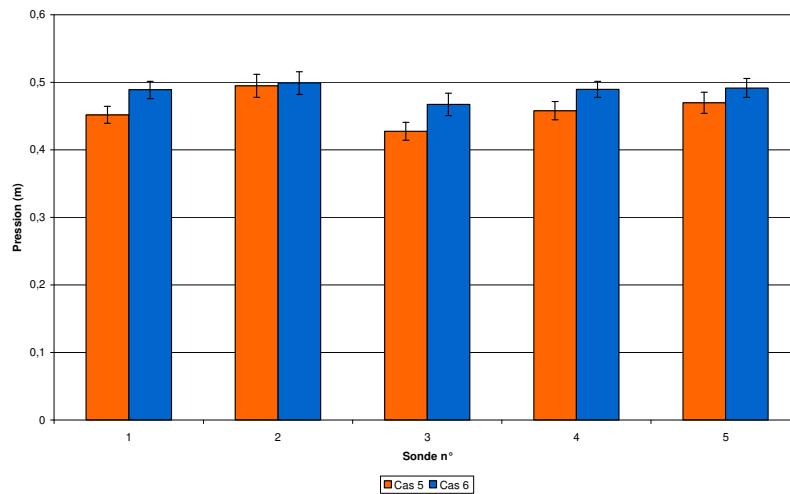


Figure 100 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 5 et 6

La moyenne est à chaque fois plus grande pour les sondes du cas 6 et les intervalles sont semblables d'un cas à l'autre. En observant la sonde 3 située le plus à l'aval du fond de fosse, on voit que la moyenne du cas 6 est plus grande de 5 cm que celle du cas 5. L'écoulement, à cet endroit, est donc moins calme pour le cas 6 ce qui explique en partie que la fosse 6 soit beaucoup plus allongée que la 5. Le fait même que les moyennes de la sonde 2 étaient presque égales indique que la pression dans l'écoulement diminue plus lentement dans le cas 6.

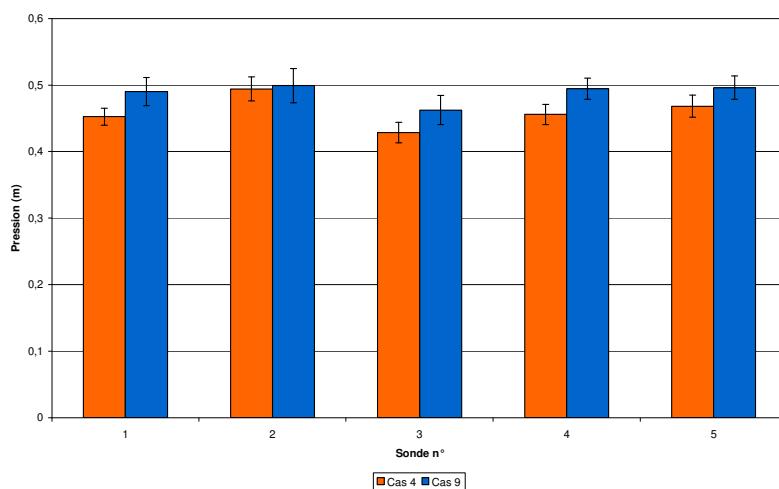


Figure 101 : Moyennes et intervalles à 95,5 % des pressions, cas 4 et 9

Les moyennes du cas 9 sont plus élevées que celles du cas 4 et les intervalles sont semblables. Cela peut paraître étrange vu que le volume dans le cas 9 est plus petit que celui du 4. Divers éléments entrent ici en jeu :

- la surface du cas 9 plus petite que la 4 ;
- la pression des jets plus importante localement dans le cas 9 ;
- la pression des jets moins grande dans le cas 4 mais étendue sur une plus grande surface.

2.5.7 Synthèse des essais

2.5.7.1 A débit constant

Maintenant que tous les résultats ont été décrits et expliqués, il reste à les rassembler afin d'expliquer de façon cohérente les différences entre les paramètres descriptifs les plus importants des fosses : le volume et la forme (pour rappel, il existe des relations entre le volume, la surface et la profondeur des fosses).

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15
Volume (m ³)	0,277	0,263	0,322	0,217	0,129	0,158	0,114	0,129	0,184	0,391
Fond de bac atteint ?	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	oui
Forme	ovale	trapézoïdale	ovale	ovale	ronde	ovale	ronde	ovale à ronde	ronde	ovale

Tableau 14 : Volume et forme des fosses à débit constant

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15
Interaction entre jets	nulle	nulle	grande	grande	nulle	très grande	moyenne	moyenne	nulle	moyenne
Dispersion spatiale	nulle	nulle	moyenne	moyenne	grande	moyenne	moyenne	moyenne	grande	moyenne
Surface zone d'impact	S	S	2S	2S	>>2S	>2S	>>>2S	>2S	>2S	2S
Angle d'impact	16°	37°	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable

Tableau 15 : Paramètres des jets à débit constant

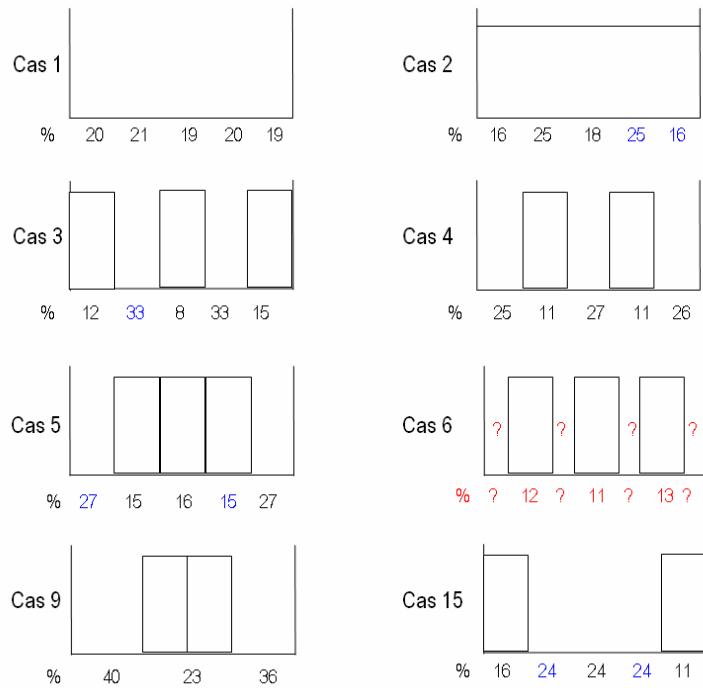


Figure 102 : Répartition du débit sur les indentations

Un angle d'impact variable signifie que les angles des jets vont de 16° à 37° . La répartition des débits sur la largeur est différente pour chaque cas.

Je constate d'abord qu'il n'y a pas de grandes différences entre les cas 1 et 2 vu que leurs volumes sont considérés comme égaux. Le fond du bac a néanmoins été atteint dans le cas 2 ce qui indique que le volume pourrait dans ce cas être encore plus grand. La forme des jets est la même mais pas leur angle d'impact. Dans le cas 2 les débits ne sont pas répartis uniformément sur la largeur en raison de la combinaison des ondes transversales et du saut de ski. La différence de forme est sans doute due aux différents débits sur la largeur. Ces ressemblances entre les cas 1 et 2 posent la question de la représentativité du modèle réduit. En effet, dans la réalité, il y a de grandes différences suite à la présence d'un saut de ski au bout de l'évacuateur de crue, à la dispersion d'énergie dans l'air du jet et à son aération. Sur le modèle réduit, les photos ont montré que l'aération du jet du saut complet est très faible et les volumes semblables indiquent que la dispersion d'énergie dans l'air est proche pour les deux cas. Les autres essais sont cependant valables parce qu'ils dépendent fortement de la géométrie des indentations et de la répartition des débits. Il est certain que d'autres différences pourraient apparaître dans la réalité en raison de l'aération des jets et du frottement de ceux-ci dans l'air.

Je compare à présent certains essais entre eux pour trouver les facteurs qui génèrent les différences entre ces cas. Je choisis en premier lieu les cas 3 et 15, que seul différencient les paramètres du volume (plus grand dans le cas 15 et potentiellement plus élevé puisque le fond du bac a été atteint), de l'interaction entre les jets et de la répartition du débit sur la largeur. Le volume du cas 15 est plus grand que celui du 3 parce que :

- l'interaction entre jets est moindre ;
- une bonne partie de l'eau des indentations retombe vers le centre sans rencontrer d'obstacle alors que la grande interaction entre jets en crée un dans le cas 3 ;
- le cas 15 envoie 72 % du débit au milieu du canal sans le dévier ni le diviser alors que le cas 3 n'envoie par son milieu que 66 % de l'eau directement dans la fosse et en deux jets distincts.

Les cas 3 et 4 sont différents tant au niveau du volume que de la répartition du débit sur la largeur. Le volume du cas 3 est plus grand que celui du 4 parce que :

- le cas 3 envoie 33 % du débit par creux directement dans le bac à graviers, alors que le cas 4 n'envoie que 26 % du débit par creux (l'érosion par jet est donc plus élevée pour le cas 3) ;
- les trois zones centrales envoient 74 % du débit dans le cas 3 et 49 % dans le cas 4 ce qui donne une plus grande force d'érosion centrale dans le cas 3. Les deux zones externes individuelles envoient le reste du débit.

Les cas 3 et 5 ont des volumes, des formes, des interactions entre jets, des dispersions de jets, des zones d'impact et des débits sur la largeur fort différents. La forme du cas 5 est ronde parce la partie centrale du débit est dispersée largement par les trois indentations et tombe dans la fosse sous une forme d'auréole circulaire. La forme du cas 3 est ovale parce qu'il y a deux creux autour de l'indentation centrale qui ne dispersent pas du tout l'écoulement et l'envoient en ligne droite vers la fosse. Bien que l'interaction entre jets soit plus grande dans le cas 3, le volume du cas 5 est le plus petit parce que la dispersion sur ses trois zones centrales est plus importante et que celles-ci envoient 46% du débit alors dans le cas 3 elles en envoient 74 %. Le reste du débit passe par les deux zones externes.

Les différences entre les cas 1 et 3 sont le volume, l'interaction entre jets ainsi que la dispersion de ceux-ci et la zone d'impact. Bien que cette zone soit deux fois plus grande dans le cas 3, celui-ci a le

plus grand volume parce qu'il rassemble 74 % du débit sur ses trois parties centrales alors que le cas 1 n'y envoie que 60 %.

Les cas 5, 7 et 8 diffèrent par leur volume, leur interaction entre jets, leur dispersion spatiale et leur zone d'impact. Le cas 7 ayant une zone d'impact plus grande a un volume plus faible que le cas 8. Le cas 7, de part sa zone d'impact plus grande, son interaction et sa dispersion moyennes, a un volume plus faible que le cas 5 qui ne présente aucune interaction. L'interaction nulle du cas 5 est compensée par sa zone d'impact plus grande que celle du cas 8 ce qui conduit ces deux cas à avoir le même volume.

Les cas 5 et 9 ont uniquement des volumes et des zones d'impact différentes. Le volume du cas 5 est beaucoup plus petit parce qu'il dispose de trois indentations pour dévier l'eau au lieu de deux dans le cas 9 et parce que ses creux envoient moins d'eau en direct vers la fosse.

Le volume du cas 6 est deux fois plus petit que celui du cas 3 parce que :

- l'interaction entre jets et la zone d'impact est plus grande dans le cas 6 ;
- le cas 6 divise le débit en sept jets dont quatre creux alors que le cas 3 ne produit que cinq jets dont deux creux qui concentrent 66 % du débit.

Toutes ces comparaisons permettent d'établir certains principes pour l'étude des fosses d'érosion :

- l'aération du jet et la dispersion d'énergie dans l'air sont négligeables sur le modèle réduit par rapport au prototype ;
- la mise en commun des creux est néfaste pour le volume (cfr. la comparaison entre les cas 3 et 15 et les cas 5 et 9) ;
- placer des indentations entre les creux diminue le volume excavé (cfr. la comparaison entre les cas 3 et 15) ;
- chaque creux fait passer un débit supérieur à celui obtenu en divisant le débit par le nombre de zones de passage (20 % si la largeur est découpée en cinq), le résultat inverse est obtenu avec les indentations ;
- toutes autres choses restant égales, une grande interaction entre jets ou une grande dispersion des jets ou une zone d'impact plus élevée permet de diminuer le volume érodé ;

- le débit passant par la zone centrale de l'évacuateur de crue a une plus grande influence sur le volume que celui passant par l'extérieur (cfr. les comparaisons entre les cas 3 et 4 et les cas 3 et 5) ;
- la présence de creux ou d'indentations groupées au centre détermine la forme de la fosse (les creux centraux conduisent à une forme ovale tandis que les indentations centrales groupées mènent à une forme ronde).

En fin de compte, c'est la disposition des indentations qui détermine les paramètres des jets et la répartition des débits. Tous les paramètres variables (volume, surface,...) mesurés avec le cadre laser ainsi que la forme des fosses en découlent. Les fosses extrêmes sont obtenues en combinant les indentations de la « bonne » ou de la « mauvaise » manière. Pour rappel, le cas 5 a été jugé comme étant le meilleur et le cas 15 comme étant le pire.

2.5.7.2 A débit variable

A débit variable, il a été prouvé que la forme des fosses reste la même tandis que ce sont le volume et les autres paramètres qui évoluent. La géométrie des « trois indentations centrales » a été jugé meilleure que celle du saut complet pour tous les débits testés.

Conclusions générales et perspectives

Ce travail mené sur une base expérimentale a permis d'étudier l'effet des indentations placées en bout de saut de ski sur la fosse d'érosion. Les caractéristiques de celle-ci ont été obtenues par la mesure, selon un maillage très dense, des variations de profondeur du bac à graviers avant et après l'essai d'érosion. Ces mesures m'ont permis de calculer bon nombre de paramètres de la fosse tels que son volume, sa surface, sa profondeur, la distance intacte entre la fosse et l'évacuateur de crue, la distance entre le point le plus profond de la fosse et le bord de l'évacuateur et enfin les pentes de ses quatre côtés. La représentation graphique des fosses a par ailleurs permis de mettre en évidence leur forme.

Dix configurations d'indentations ont été testées ainsi que trois débits différents. Les essais à débit variable ont montré que la forme de la fosse ne dépend pas du débit et que le « classement » des différents cas est conservé indépendamment de la variation du débit. Les multiples dispositions d'indentations donnèrent des résultats fort différents. Il était prévu d'expliquer ces différences sur base de quatre paramètres mais deux d'entre eux se sont révélés inutilisables. En effet, les mesures d'énergie aux bornes du modèle réduit n'ont pas permis d'étudier les variations de la dissipation d'énergie parce que celle-ci était constante pour tous les cas ; les essais de pression sous les jets n'ont pu être comparés entre eux du fait des contraintes techniques qui ne me permettaient pas de placer les sondes aussi bas que désiré ce qui provoqua un manque de cohérence dans leur positionnement. Nous n'avons dès lors pu utiliser que la mesure de la répartition du débit sur la largeur de l'évacuateur de crue et l'étude des jets entre cet évacuateur et le bassin de dissipation. Ces paramètres m'ont donné de bons résultats et m'ont permis d'établir que les variations du volume et des autres paramètres (surface, profondeur, etc.) à débit constant ainsi que les différentes formes des fosses sont le fait de la répartition du débit sur la largeur de l'évacuateur de crue et des caractéristiques des jets, ces deux facteurs dépendant directement de la disposition des indentations. La dépendance des paramètres de la fosse à la disposition des indentations est très forte au point qu'une légère modification de cette disposition transforme de « bons » résultats en « mauvais ».

L'étude de ce sujet pourrait être améliorée en réalisant les actions suivantes :

- mesurer les quelques débits manquant sur la largeur de l'évacuateur de crue pour connaître mieux encore leur répartition ;
- disposer les sondes de pression à la position réelle du fond de la fosse dans chaque cas (soit en rehaussant tout l'évacuateur de crue et en rajoutant une bonne épaisseur de graviers afin que les fonds de fosse ne soient jamais à moins de 19 cm du fond du bac soit en répétant tous les essais avec un débit plus faible pour ne pas creuser trop profondément les fosses) ;
- placer un plus grand nombre de sondes de pression sur une surface plus importante afin d'avoir une meilleure image des variations de pression dans la fosse ;
- supprimer la pile centrale de l'évacuateur de crue pour diminuer les ondes transversales et les phénomènes parasites qui y sont liés.

J'espère que cette étude contribuera, modestement, à faire avancer la technique des barrages et à préserver l'environnement en améliorant le système « saut de ski – fosse d'érosion » par la mise en place réfléchie d'indentations au bord de l'évacuateur de crue.

Ce travail m'a permis d'employer toute une série de connaissances acquises au fil de mes cinq années d'études et m'encourage à les mettre en pratique au service de la société dans ma future vie professionnelle.

Bibliographie

Livres

- [I] Brasseur N., *Généralisation du logiciel de pilotage du cadre de mesure du laboratoire d'hydrodynamique appliquée et des constructions hydrauliques*, Université de Liège, Liège, 2007.
- [II] Léonard O., *Notes de cours de Turbomachines*, Université de Liège, Liège, 2008.
- [III] Khatsuria R. M., *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators : chapter 21 Trajectory Buckets*, Marcel Dekker, New-York, 2005.
- [IV] Erpicum S., *Notes de cours de Constructions Hydrauliques*, Université de Liège, Liège, 2009.
- [V] Charlier R., *Note de cours de Géotechnique Tome 1 : Mécanique des sols*, Centrale des Cours de l'A.E.E.S., Liège, 2007.
- [VI] Robert P., Rey-Debove J. et Rey A., *Dictionnaire Le Petit Robert*, Dictionnaire Le Robert, Paris, 2000.
- [VII] Lejeune A., *Notes de travaux pratiques du cours de Mécanique des fluides*, Centrale des cours de l'A.E.E.S., Liège, 2000.
- [VIII] Bruhat G., *Mécanique*, 6ème édition, Masson, Paris, 1967.
- [IX] Pirard E., *Notes de cours d'Analyse Spatiale des données Géo-Environnementales*, Centrale des cours de l'A.E.S.S., Liège, 2006.
- [X] Heigerth G., Hammer A. et Geisler T, *Improving the safety of an old Austrian dam*, In : Technologies to enhance dam safety and the environment, 25th annual USSD Conference, Salt Lake City, 2005.
- [XI] Novak P., Nalluri C., Narayanan R., *Hydraulic structures : chapter 5 Energy Dissipation*, Taylor & Francis Books, 2007.
- [XII] Pirotton M., Archambeau P., Detrembleur S., Dewals B., Erpicum S. et Fraikin C., *Notes de cours d'Hydraulique appliquée*, Université de Liège, Liège, 2007.

Sites Web

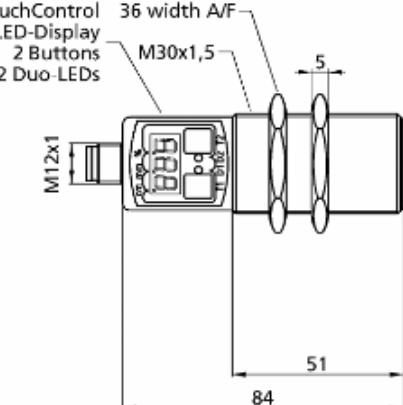
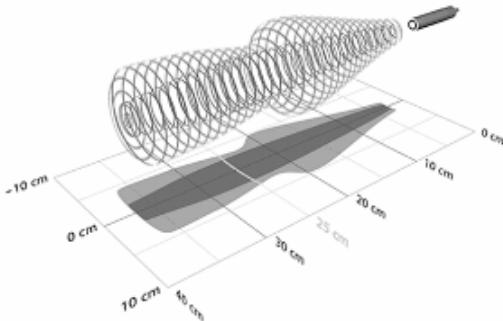
- [1] *Site de l'unité « Génie civil et environnemental » de l'UCL,* <http://www.gce.ucl.ac.be/etudiants/visites/0010hastiere/hastiere.html>, consulté le 15 mars 2009.
- [2] *Site de vente d'outils,* <http://www.le-jardin-de-catherine.com/boutique>, consulté le 19 mars 2009.
- [3] *Site de la firme Microsonic,* www.microsonic.de, consulté le 20 mars 2009.
- [4] *Cours de l'Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne,* http://ielnx1.epfl.ch/e-lin/Ryhming/documents/chapters/documents_published/doc7/node254.html, consulté le 21 mars 2009.
- [5] *Site de la firme « Nixon Flowmeters Ltd »,* <http://www.nixonflowmeters.co.uk/>, consulté le 21 mars 2009.
- [6] *Dossier sur les barrages de l'Association pour la Connaissance des travaux publics en France,* http://www.planete-tp.com/rubrique.php3?id_rubrique=12, consulté le 30 mars 2009.
- [7] *Association des diplômés de l'école polytechnique fédérale de Lausanne,* http://a3.epfl.ch/SEBern/berncnf08_5.html, consulté le 7 avril 2009.
- [8] *Banque de données de médias en accès libre,* http://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C3%89vacuateur_de_crues_R-B.jpg, consulté le 7 avril 2009.
- [9] *Site sur les lacs Pyrénéens,* www.lacsdespyrenees.com, consulté le 7 avril 2009.
- [10] *Site sur la Corrèze,* www.lacorreze.com, consulté le 21 avril 2009.
- [11] *Site de la firme Keller,* www.keller-druck.ch, consulté le 9 mai 2008.
- [12] Dereumaux P., *Cours de l'académie Aix-Marseille, section génie électrique,* <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/dereumaux/mesurepression.htm>, consulté le 9 mai 2008.

Annexes

Sondes de distance Mic+25/IU/TC de la firme *Microsonic* [3]

mic+25/IU/TC

mark for sensor comparison

housing	detection zone
	
	1 x analog 4-20 mA + 0-10 V
	350 mm
operating range	30 - 250 mm
design	cylindrical M30
operating mode	analogue distance measurements
ultrasonic -specific	
means of measurement	echo propagation time
transducer frequency	320 kHz
blind zone	30 mm
operating range	250 mm
maximum range	350 mm
angle of beam spread	please see graphics detection zone
resolution, sampling rate	0.025 mm
reproducibility	± 0.15 %
accuracy	≤ 2 % (temperature drift internal compensation)
electrical data	
operating voltage U_B	9 - 30 V d.c., reverse polarity protection
voltage ripple	± 10 %
no-load current consumption	≤ 80 mA
type of connection	5-pin M12 initiator plug

outputs	
output 1	analogue output current: 4-20 mA / voltage: 0-10 V (at $U_g \geq 15$ V), short-circuit-proof switchable rising/falling
response time	32 ms
delay prior to availability	< 300 ms
inputs	
input 1	com input synchronisation input
housing	
material	Brass sleeve, nickel-plated, Plastic parts, PBT, TPU
ultrasonic transducers	polyurethane foam, epoxy resin with glass contents
class of protection to en 60529	IP 67
operating temperature	-25°C to +70°C
storage temperature	-40°C to +70°C
weight	110 g
further versions	stainless steel cable connection (on request)
further versions	mic+25AU/TC/E
technical features/characteristics	
temperature compensation	yes
controls	2 pushbuttons + LED display (TouchControl)
scope for settings	Teach-in TouchControl LCA-2 with LinkCopy or LinkControl Software
synchronization	yes
multiplex	yes
indicators	3-digit LED display, 2 x three-colour LED
highlights	Display

Sondes de vitesses 403 et 404 de la firme « Nixon Flowmeters Ltd » [5]

Streamflo Velocity Meter



Introduction

The Streamflo series of instruments are used to measure, indicate and record very low velocities of water and other conductive fluids. Designed primarily for laboratory and specialised industrial use, the miniature head of the flow sensing probe can be inserted into small ducts and channels where it has the ability to measure velocities as low as 5.0 cm/sec. It is thus suitable for measuring accurately the velocities in hydraulic models of river estuaries, dams, harbours, etc., in addition to field measurements of clean water flows.

Using indicator model 430, a completely portable system requiring no mains supply is available. This is ideal for carrying around from one measuring point to the next.

The use of two probes allows the range of detectable flow rates to be extended up to 300 cm/sec.

All components have been chosen carefully to give long reliable life with the minimum changes in calibration within the operating temperature range stated under specification.

The sensing probe was originally designed by the British Department of Scientific and Industrial Research. Further development by Nixon Flowmeters has resulted in a compact system offering digital indication with optional recording facilities.

Operating Principle

The sensing probe is a measuring head joined by a slim tube to the plug and socket which connects to the measuring instrument.

The measuring head comprises a five bladed PVC rotor mounted on a hard stainless steel spindle, itself terminating in fine burnished conical pivots which run in jewels mounted in a shrouded frame. Minimum frictional resistance is thus ensured. An insulated gold wire contained within the tube terminates 0.1 mm from the rotor blade tips. When the rotor is revolved by the movement of a conductive liquid, the passage of the rotor blades past the gold wire tip slightly varies the measurable impedance between the tip and the tube. This variation is used to modulate a 15 kHz carrier,

signal, generated within the indicating instrument which in turn is applied to the electronic detector circuits.

All components have been chosen carefully to give long reliable life with the minimum changes in calibration within the operating temperature range stated under specification.

Automatic compensation is made for changes in liquid conductivity. Following amplification and filtering out of the carrier frequency, a square wave signal is obtained. In the digital indicator the pulses are counted over a known time period to obtain a digital reading.

Probes

- 403 Standard low speed velocity probe for the range 5.0 to 150 cm/sec.
- 404 Standard high speed velocity probe for the range 60 to 300 cm/sec.
Fitted with streamlined fairing to provide additional mechanical strength and freedom from turbulence at higher velocities.
150 cm/sec.
- 423 90 Degree angles probe to measure vertical velocities over the range 5.0 to 150 cm/sec

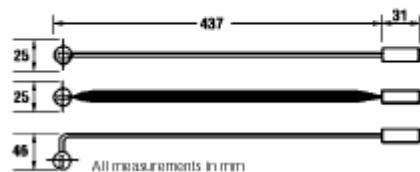
With all probes, increased immersion depths can be provided to special order. The maximum length of probes is only restricted by shipping constraints. Sealed probe/cable connectors have been supplied to enable immersion of the cable and probe assembly.



.....Precision Counts

Probe Parts & Materials

Rotor	11.6 mm diameter PVC machined from solid and balanced
Spindle	Hardened stainless steel with conical ends
Bearings	Synthetic sapphire vee jewels
Cage	Heavy Chromium plated brass
Stern	Stainless steel
Input Socket	BNC
Weight	0.20 kg



Technical Data

Velocity Range	5 to 150 & 60 to 300 cm/sec using two sensing probes
Accuracy	$\pm 1.5\%$ of true velocity
Sealing	digital indicators scaled in Hz or cm/sec
	Conversion to cm/sec by means of individual calibration curves
Operating temp.	0 to 50°C
Operating Medium	Water or other fluid having similar conductive properties.

Sondes de pression PR-41PRO de la firme Keller [11]



TRANSMETTEURS DE PRESSION CAPACITIFS ETENDUES DE MESURE 1* A 300 mbar / RESOLUTION 1 µbar

SERIE 41 X SERIE 41 X Ei

Le transmetteur série 41 X est dédié à la mesure de basses pressions. Il associe une électronique numérique à microprocesseur à une cellule capacitive en céramique. Les valeurs de pression sont évaluées par compensation polynomiale (voir au verso) à partir des signaux émis par les capteurs de température et de pression.

L'interface RS485 permet d'exploiter les mesures au moyen d'un PC, de les mémoriser et de réaliser la programmation du transmetteur.

Les transmetteurs sont compensés aux étendues de mesure (EM) standard. Le logiciel PROG30 permet, par programmation, d'ajuster la sortie analogique à toutes les plages de pression à l'intérieur de l'EM standard (par exemple, 20...60 mbar = 4...20 mA pour un transmetteur d'EM standard 0...100 mbar = 4...20 mA).

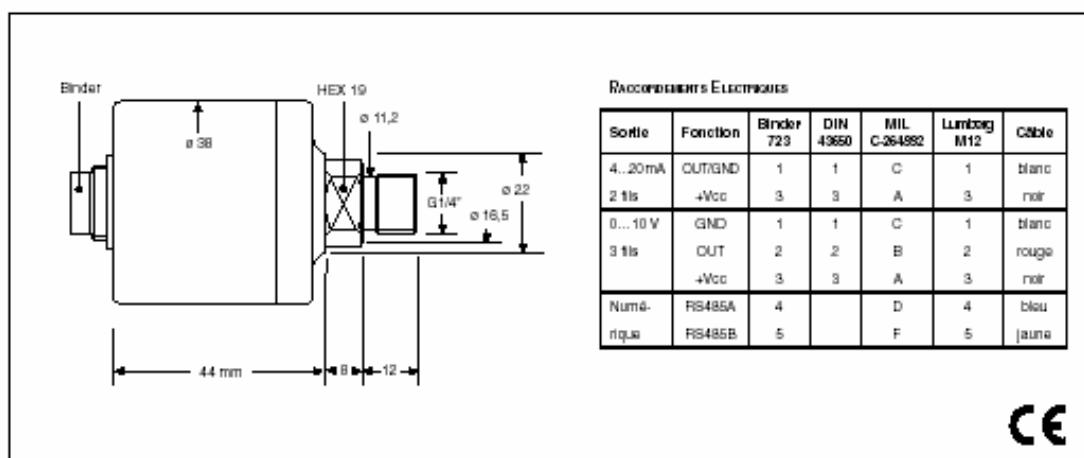
L'utilisation de convertisseurs RS de la série K-100 de KELLER permet de regrouper jusqu'à 128 transmetteurs sur un même bus. Les signaux des transmetteurs peuvent être lus au moyen d'un PC et du logiciel READ30. Ce dernier permet d'interroger chaque transmetteur pour connaître la pression actuelle et de suivre ou de mémoriser "on line" l'évolution de la pression en fonction du temps.



Ce transmetteur est aussi disponible en version sécurité intrinsèque (Série 41X Ei). Il peut être utilisé dans les zones explosives qui exigent les classes de protection des catégories 1 et 2.



*par amplification de l'étendue de mesure 10 mbar



KELLER se réserve le droit de modifier ce document sans préavis.

12/00

KELLER AG für Druckmesstechnik
KELLER Métrologie de la Pression

St. Gallerstrasse 119
9, Boulevard de l'Europe

CH-8404 Winterthur
F-68100 Mulhouse

Tel. 41 (0)52 - 235 25 25
Tél. +33 (0)3 89 98 33 12

Fax 41 (0)52 - 235 25 00
Fax +33 (0)3 89 98 33 13

KELLER AG, société certifiée ISO 9001:2000

www.keller-chd.com



KELLER

Spécifications

Etendues de Mesure Standard (EM)			
PR-41 X (rel.)	PD-41 X (diff.)	30	100
Surpression		300	1000
Surpression nég.		300	100
		300	300
		2 lls	3 lls
Alimentation (U) 41 X		8...28 VDC	13...28 VDC
Alimentation (U) 41 X EI		10...28 VDC	15...28 VDC
Sortie analogique (programmable)		4...20 mA	0...10 V
Charge admissible (Ω)		< (U-8V)/0,02 A	> 5K
Stabilité		EM \geq 100 mbar : $\pm 0,1\%$ EM	EM \leq 100 mbar : $\pm 0,1$ mbar
Température de service		-20...80 °C	
Plage compensée		10...50 °C	
Bandé d'erreur*		$\pm 0,1\%$ EM typ.	$\pm 0,2\%$ EM max.

* Dans la gamme de température compensée

Raccord pression	1/4" gaz mâle, joint plat viton®
Raccordement électrique	Embase Binder, série 723 (5 broches)
En contact avec le fluide mesuré	Acier inoxydable (type AISI 316L), joint nitrile, membrane céramique dorée
Fluides mesurés	Gaz et liquides. PD port - : gaz secs non agressifs
Protection / Masse	IP 40 / env. 200 g
Versions spéciales	<ul style="list-style-type: none"> - IP 67 - Autres connecteurs (voir au recto) - Sortie par câble - EM négative/positive, par exemple -10...+10 mbar - Version sécurité intrinsèque pour l'utilisation dans les zones explosives

Toutes les EM intermédiaires sont réalisables sans plus valuer la reprogrammation de la sortie analogique d'un transmetteur d'EM standard.** Option : compensation directe à une EM intermédiaire (plus valeur si moins de 20 pièces). Pour des EM plus élevées et des mesures différentielles liquidliquide, utiliser respectivement les transmetteurs 38 X et 39 X.

** Prière de noter que la bande d'erreur augmente proportionnellement



PD-41 X

Øm : ø 40 x 62 mm

Compensation polynomiale

Il s'agit d'une modélisation mathématique permettant de restituer la valeur exacte de la pression (P) en fonction des signaux mesurés par les capteurs de pression (S) et de température (T). Le calcul de P est effectué par le microprocesseur du transmetteur selon le polynôme qui suit :

$$P(S,T) = A(T)S^3 + B(T)S^2 + C(T)S + D(T)S^0$$

Avec, pour les coefficients A(T)...D(T) fonction de la température :

$$A(T) = A_0 T^3 + A_1 T^2 + A_2 T^1 + A_3 T^0$$

$$B(T) = B_0 T^3 + B_1 T^2 + B_2 T^1 + B_3 T^0$$

$$C(T) = C_0 T^3 + C_1 T^2 + C_2 T^1 + C_3 T^0$$

$$D(T) = D_0 T^3 + D_1 T^2 + D_2 T^1 + D_3 T^0$$

Le transmetteur est soumis en usine à des tableaux de pression et de température. Les mesures correspondantes de S permettent alors, à partir des valeurs exactes de la pression et de la température, de calculer les coefficients A0...D3, lesquels sont enregistrés dans l'EEPROM du microprocesseur.

Quand le transmetteur de pression est en service, le microprocesseur enregistre les signaux (S) et (T), calcule les coefficients fonction de la température et restitue la pression exacte par résolution de l'équation P(S,T).