



Unité de recherche Erosion Torrentielle Neige Avalanches



Pôle grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la prévention des risques naturels

Interactions

Ecoulements torrentiels – Ouvrages terminaux de plages de dépôt

Rapport final

Ph.Frey, S. Tannou, J.M. Tacnet, D. Richard, V. Koulinski

Groupement de Grenoble
Domaine universitaire - BP 76
38402 St Martin d'Hères Cedex
Tel : 04 76 76 27 27
Fax : 04 76 51 38 03

Décembre 1999

Avant-propos et Remerciements

Ce rapport rend compte de travaux financés par le Conseil Général de l'Isère dans le cadre de l'appel à propositions de recherches du Pôle Grenoblois d'études et de recherches sur les risques naturels (programme 1998).

Ces travaux ont été réalisés au laboratoire du Cemagref de Grenoble avec le concours du bureau d'étude ETRM et du Service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Nous tenons à remercier les techniciens et les ingénieurs des services RTM de la Savoie, de l'Isère et des Hautes Alpes qui nous ont accompagné lors de nos visites de terrain.

Ces travaux ont concrètement été réalisés par plusieurs stagiaires de fin d'étude :

- Nicolas Paroche ENSHMG Grenoble
- Sébastien Tannou, Insa Lyon

Assistés de Rodolphe Bucher (ISIM Montpellier) et Elisa Dacas (Université de Padoue, Italie)

Sommaire

1	Introduction	7
2	Eléments bibliographiques et visites de terrain	9
2.1	Eléments bibliographiques	9
2.2	Visites de terrain	10
3	Protocole expérimental	11
3.1	Similitude	11
3.2	Choix d'une géométrie	12
3.3	Conditions expérimentales	13
3.4	Essais et mesures	15
4	Analyse des résultats expérimentaux	17
4.1	Blocage mécanique	17
4.2	Description sommaire du stockage et du transit de la charge solide	17
4.3	Volumes à l'équilibre	19
4.4	Débits solides sortants	21
4.5	Profil en long final	22
4.5.1	Hauteurs d'eau claire à l'amont de la fente	23
4.5.2	Hauteur de mélange	24
4.5.3	Pentes d'atterrissement	25
4.5.4	Calcul théorique du volume final	27
4.6	Avancée du front	28
4.7	Changement de débit durant l'essai	29
5	Discussion	31
5.1	Forme et modelé de la plage	31
5.2	Type d'ouvrage aval	33
5.3	Problème des flottants	34
6	Conclusions	35
7	Références	37

Annexe A : Dossier photographique

Annexe B : Volumes déposés, débits solides sortants et hauteurs d'eau

Annexe C : Définitions, données mesurées et calculées avec leurs incertitudes

Annexe D : Profils en long au cours du temps

1 Introduction

Pour lutter contre les crues torrentielles caractérisées par un important apport solide, les premières mesures appliquées par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) consistent à lutter contre l'érosion à la source à l'aide de reboisements, de consolidations par seuil et de drainage. Il s'agit de la correction active qui reste toujours d'actualité.

Cependant dans de très nombreux cas, la correction active n'est pas suffisante pour assagir le torrent. Il s'agit alors de gérer les crues torrentielles qui se présentent au sommet des cônes de déjection généralement fortement urbanisés et qui ne permettent donc plus un épandage ou un dépôt naturel des charges solides.

La première idée est de faire transiter l'ensemble de l'écoulement dans un chenal bien dimensionné jusqu'au confluent avec la rivière. Cependant, cette solution nécessite généralement un redimensionnement du chenal existant avec par exemple élargissement, exhaussement, création de lit majeur ou de digues. En outre les ouvrages de franchissement sont généralement à reconstruire. Cette solution est donc rarement aisée à mettre en place pour des questions par exemple de manque de place ou de coûts élevés.

La deuxième idée est de retenir tout ou partie de la charge solide dans des ouvrages appelés génériquement « plage de dépôt ». De tels ouvrages ont été implantés dans les Alpes françaises depuis une vingtaine d'année. Selon le bassin versant torrentiel, les écoulements générateurs de dégâts peuvent être de nature très différente. Il peut s'agir de laves torrentielles, coulées boueuses et rocailleuses à faible teneur en eau ou bien d'écoulements diphasiques plus ordinaires mais toujours avec un fort transport solide sous forme de charriage. En pratique les deux phénomènes peuvent avoir lieu dans le même torrent. Le charriage par opposition avec la suspension consiste dans le roulement, le glissement ou de brefs sauts des particules solides.

Selon le phénomène contre lequel on souhaite se prémunir, la conception largement empirique des plages de dépôt sera sensiblement différente.

Ce projet se limite à l'étude des plages de dépôt destinées à recueillir du matériau solide charrié. La Figure 1-1 montre un exemple de plage de dépôt parmi une grande diversité. De nombreux types d'ouvrages terminaux ont été proposés généralement à base d'une ou plusieurs fentes munies ou non de grilles.

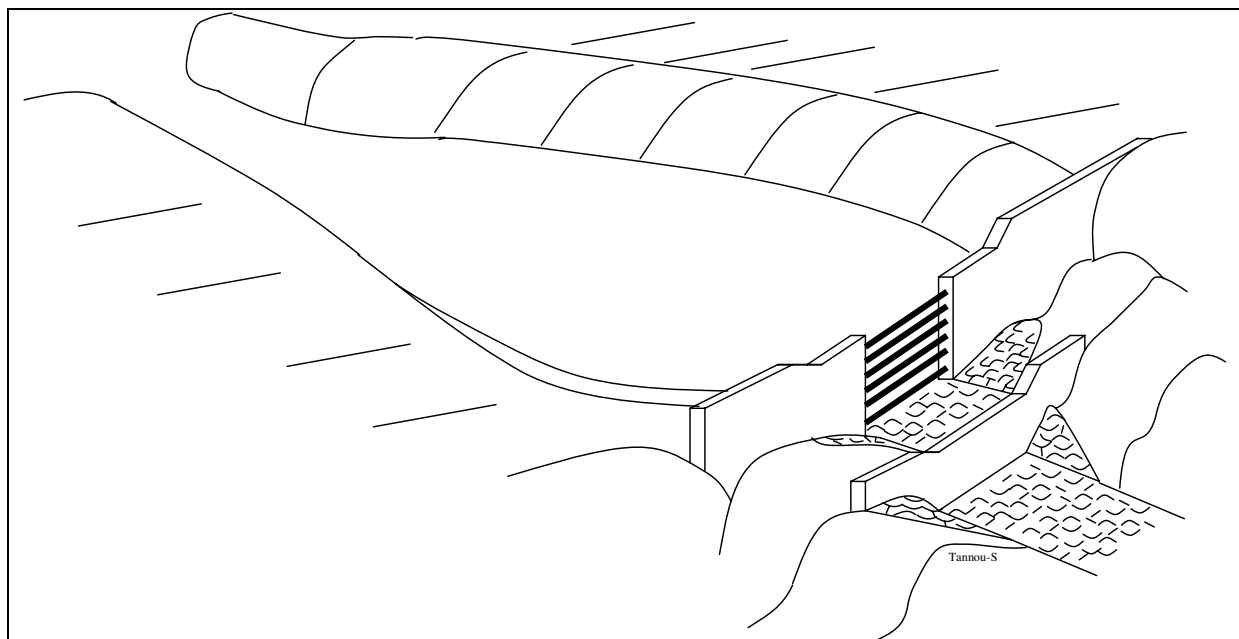


Figure 1-1 : schéma d'une plage de dépôt

Cet ouvrage joue un rôle important car il est censé réguler le transit en matériau solide. Or il a été constaté que cette régulation avait rarement lieu dans la mesure où de nombreuses plages de dépôt arrêtent l'ensemble des matériaux. Cela entraîne deux conséquences complémentaires :

- le **creusement du lit en aval** de l'ouvrage par déficit de matériaux solides. La tendance naturelle au dépôt et au débordement sur le cône de déjection s'inverse, le lit se creuse, déstabilisant les différents ouvrages. Il est alors généralement nécessaire de mettre en place une série de seuils souvent plus coûteuse que l'ouvrage initial. Ce creusement est d'autant plus sensible que les biefs sont plus érosifs¹.
- le **comblement abusif des plages de dépôt** par des matériaux transportés ordinairement par le torrent. Pour des matériaux déposés dont les caractéristiques mécaniques et physiques permettent d'envisager une réutilisation, il s'agit plutôt d'un avantage, ces matériaux pouvant être valablement exploités et valorisés. Dans la plupart des cas, les matériaux érodés par les torrents sont de piètre qualité et le curage de la plage de dépôt devient une charge financière d'autant plus difficilement supportable qu'elle est fréquente.

C'est dans ce contexte qu'une étude expérimentale des plages de dépôt et plus particulièrement des ouvrages terminaux a été proposée et partiellement financée par le Pôle grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la prévention des risques naturels.

Mentionnons que ce même organisme a également aidé le Cemagref et le RTM à la mise en place du suivi de terrain du comportement de dispositifs torrentiels à l'aval de plages de dépôts (programme 1997).

L'objectif de ce projet de recherche est donc de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique des plages de dépôt existantes afin de proposer des pistes pour la conception d'ouvrages « filtrants » ne retenant pas toute la charge solide.

¹ Il faut noter ici que dans certaines régions alpines notamment dans le Tirol le problème ne se pose pas dans les mêmes termes. Les torrents n'ont pas forcément d'exutoire naturel et le chenal sur le cône de déjection est à fond fixe bétonné et destiné à ne recevoir que de l'eau. La plage de dépôt doit alors retenir l'ensemble des matériaux même assez fins. Parfois, la plage de dépôt est couplée à un bassin de laminage supposé réduire le pic de débit d'eau claire car le chenal aval souvent sous-dimensionné ne peut être agrandi du fait d'une urbanisation encore plus dense que dans les Alpes françaises.

2 Eléments bibliographiques et visites de terrain

2.1 Eléments bibliographiques

Il existe peu de documents scientifiques concernant les plages de dépôt et leur ouvrage aval. De nombreuses publications émanent d'organismes et de chercheurs autrichiens ou japonais. Les principales difficultés rencontrées lors de ces recherches tiennent au fait que toutes les parutions ne sont pas rédigées en anglais et ne sont souvent que des rapports d'études (littérature grise). Citons néanmoins les actes des congrès de l'association internationale de recherche Interpraevent qui comprennent la plupart des articles que nous avons consultés. Par ailleurs de nombreux travaux, axés sur la compréhension du fonctionnement des plages ont été réalisés dans le cadre particulier du phénomène des laves torrentielles ou se limitent au problème des flottants, deux sujets que nous n'abordons pas ou peu dans ce rapport. En outre, de nombreux articles concernent les dispositions constructives des ouvrages (stabilité, durabilité) au contraire des aspects hydrauliques qui sont rarement traités.

Enfin, mentionnons que le remplissage d'une plage de dépôt s'apparente au remplissage mieux documenté d'un réservoir de barrage par des matériaux grossiers avec cependant une échelle de temps très différente.

Nous donnons ici des références dans les domaines suivants :

- Généralités sur les plages de dépôt : Zollinger (1984, 1986), Sogreah (1992), numéro spécial de « Wildbach und lawinenverbau » (Août 1998) ;
- Fonctionnement des plages de dépôt avec fente munie ou non de grilles : Ikeya (1985), Mizuyama et al. (1988), Ishikawa et al. (1996), Mizuyama et al. (1996), Cavinato et al. (1996) ;
- Problème des flottants : Ishikawa et Mizuyama (1988) et de nombreux articles dans les actes de Interpraevent 1996 ;
- Etude des profils en long des dépôts de matériaux grossiers dans des réservoirs : Hotchkiss et Parker (1991), Chitale et al. (1998).

En France, l'aménagement des torrents de montagne est géré par les services de Restauration des terrains en montagne (RTM). En 1997, Un recensement exhaustif des plages de dépôt a été réalisé au service RTM National par F. Gruffaz sous la forme de fiches synthétiques d'identification. Celles-ci regroupent notamment les informations concernant les

caractéristiques du torrent (superficie du bassin versant, type de transport, etc.), les caractéristiques géométriques de la plage (longueur, pente) et le type d'ouverture de l'ouvrage aval.

Mentionnons au passage qu'environ trois-quarts des plages se situent dans les départements de l'Isère, de Savoie et dans une moindre mesure de Haute Savoie.

Pour plus de la moitié d'entre elles, l'ouvrage aval est constitué d'une ou plusieurs fentes généralement munies d'une grille alors qu'il s'agit d'un pertuis dans environ un quart des cas.

2.2 Visites de terrain

La synthèse du RTM nous a permis d'identifier les sites correspondant au fonctionnement en charriage, cadre particulier de cette étude. Des ouvrages ont été visités en Isère, en Savoie et en Hautes Alpes.

Il nous a semblé intéressant de visiter quelques ouvrages représentatifs en présence de techniciens ou ingénieurs des services RTM pour bénéficier de leurs explications. Qu'ils en soient ici remerciés. Il apparaît que la conception des plages de dépôt reste largement empirique. Si l'estimation des volumes fait l'objet d'un calcul à partir des données historiques et des pentes d'atterrissement usuellement observées, tel est rarement le cas pour les dimensions de l'ouvrage terminal. Dans le cas d'une fente avec grilles horizontales, il est souvent prévu de pouvoir régler en hauteur les profilés qui constituent la grille.

Dans les faits, la conception prend en compte de nombreuses autres contraintes comme par exemple la stabilité de l'ouvrage, la maîtrise foncière ou la nécessité de pouvoir passer un engin à travers la fente.

L'annexe A contient un dossier photographique.

3 Protocole expérimental

3.1 Similitude

Nos essais sur modèle réduit seront réalisés en appliquant les règles classiques de la similitude de Froude pour l'écoulement liquide à surface libre. Le respect du nombre de Froude

$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$ implique en choisissant un facteur d'échelle géométrique $r = \frac{L_{\text{modèle}}}{L_{\text{nature}}}$ les facteurs d'échelles suivants (L : longueur, U : vitesse, t : temps, Vol : Volume, Q : débit) :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{modèle}} / U_{\text{réel}} = r^{1/2} \\ t_{\text{modèle}} / t_{\text{réel}} = r^{1/2} \\ Vol_{\text{modèle}} / Vol_{\text{réel}} = r^3 \\ Q_{\text{modèle}} / Q_{\text{réel}} = r^{5/2} \end{array} \right.$$

Le respect de la similitude du transport solide est plus délicate. En adimensionnalisant toutes les grandeurs mises en jeu, il est possible de montrer que le facteur d'échelle pour les diamètres des particules peut être pris égal au facteur d'échelle géométrique r à condition que le modèle ne soit pas distordu et que les densités naturelle et modélisée soient les mêmes. Une explication complète peut être trouvée dans Eroslope (1996) et Tannou (1999).

En outre, Le nombre de Reynolds du grain doit être suffisamment élevé pour éviter la formation de rides en surface du dépôt solide (Lefort, 1996 ; Yalin, 1977). En pratique cela revient dans notre cas à imposer un diamètre minimum de particule de 0,4 mm. Cette condition peut se révéler contraignante sur le choix de l'échelle géométrique qui ne peut être trop faible.

3.2 Choix d'une géométrie

Les visites de terrain ont permis d'appréhender les dimensions typiques des plages de dépôt destinées prioritairement au transport solide par charriage. Une grande variabilité existe même si certaines proportions sont semblables. Une largeur de fente de 4 à 6 m est couramment observée. Nous disposons également des données statistiques obtenues par le RTM national. Ainsi 90 % des plages en France ont un volume de moins de 25 000 m³ et 70% moins de 6 000 m³.

Par ailleurs, les principales contraintes de nos installations expérimentales sont une largeur l limitée à 60 cm, un débit liquide maximal Ql de 3 l/s et une durée maximale d'environ 30 minutes résultant du volume maximal stockable dans la trémie d'alimentation sans mentionner les problèmes de manutention (merci aux stagiaires) . Il faut également ajouter la contrainte sur le diamètre minimal de grain de 0,4 mm de notre granulométrie qui s'étend jusqu'à environ 12 mm. (voir Figure 3-2)

Lorsqu'on fait varier le facteur d'échelle géométrique r , un même modèle réduit peut représenter des réalités différentes. Nous donnons dans le Tableau 3-1 des exemples de similitude.

L'échelle 1/50^e permet déjà de représenter des plages assez conséquentes avec une largeur de 30 m et des crues de type centennale.

Des plus grosses plages et des plus grosses crues pourront être simulées avec une échelle de 1/80^e et des plus petites avec 1/30^e.

Le point délicat reste le diamètre minimal de 0,4 mm qui impose par exemple avec une échelle de 1/50^e un diamètre minimal réel de 2 cm généralement plus grossier que celui rencontré en torrent.

	Modèle	Réalité
Echelle 1/50 ^e		
Ql	1,6 l/s	28,3 m ³ /s
	2,3 l/s	40,6 m ³ /s
L	0,6 m	30 m
D ₉₉	12 mm	60 cm
D ₅₀	0,4 mm	2 cm
Temps	30 min	3 h 32
Echelle 1/80 ^e		
	Modèle	Réalité
Ql	1,6 l/s	91,6 m ³ /s
	2,3 l/s	131,6 m ³ /s
L	0,6 m	48 m
D ₉₉	12 mm	96 cm
D ₅₀	0,4 mm	3,2 cm
Temps	30 min	4 h 28

Tableau 3-1 : exemple de similitude

3.3 Conditions expérimentales

Les modèles réduits sont placés dans le canal inclinable du Cemagref (Figure 3-1). La zone amont permet la régulation du débit liquide, un bon mélange eau/solide et une alimentation sur toute la largeur de la zone aval qui constitue notre zone d'étude. Cette zone correspond à la partie terminale d'une plage de dépôt. La largeur vaut 60 cm et la longueur environ 1 m (Figure 3-3).

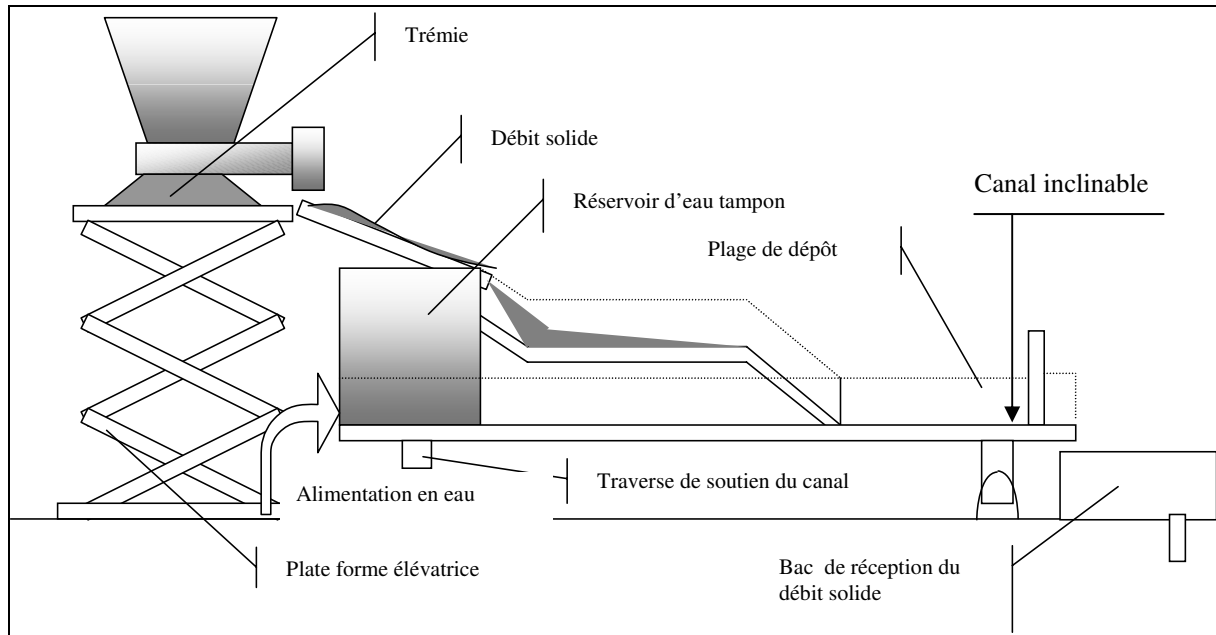


Figure 3-1 : Vue générale de l'installation expérimentale

Insistons sur le fait que nous n'avons pas cherché à modéliser une plage de dépôt entière mais uniquement la partie terminale. C'est pourquoi nous avons attaché une certaine importance à l'obtention d'un débit solide régulièrement réparti sur la largeur en amont de la zone d'étude

Différents ouvrages terminaux amovibles peuvent être placés en aval avec différentes largeurs de fente. Le matériau naturel utilisé, mélange de sable et de gravier, présente une granulométrie étendue entre 0,4 et plus de 12 mm (Figure 3-2 et Tableau 3-2).

Diamètre (mm)	
D ₅₀	1,7 mm
D ₉₀	8,0 mm
D ₃₀	0,99 mm
D ₉₀ /d ₃₀	8,0

Tableau 3-2: grandeurs caractéristiques du matériau expérimental

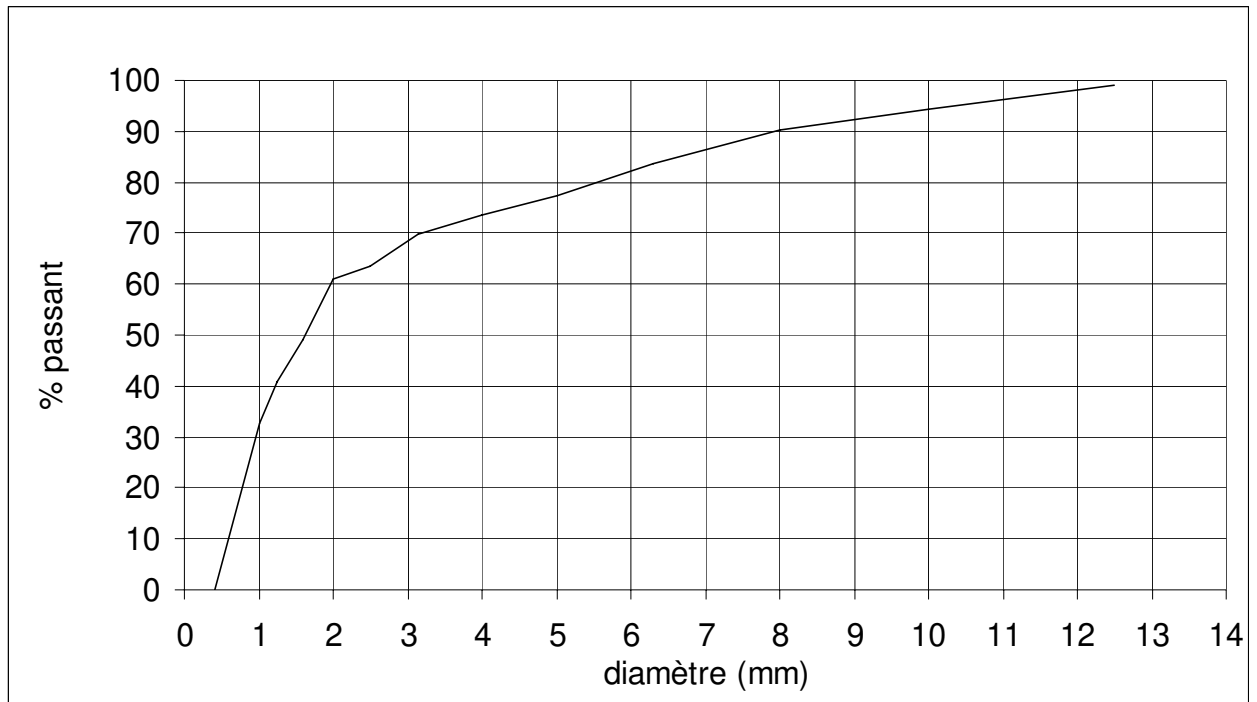


Figure 3-2 : Granulométrie du matériau expérimental

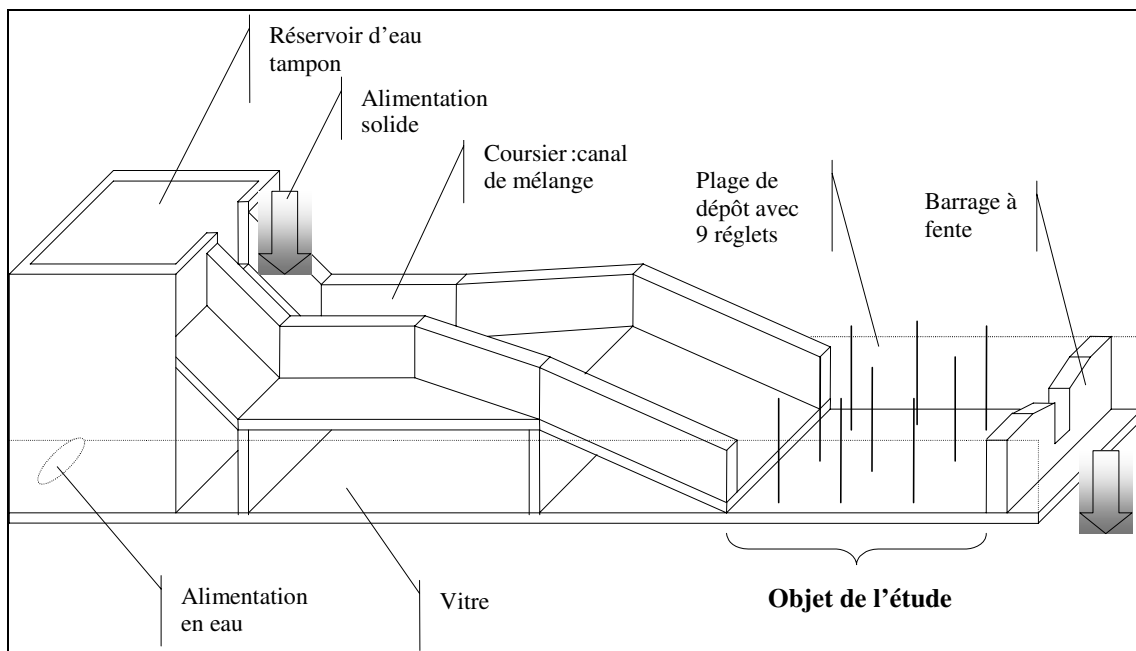


Figure 3-3 : le canal expérimental avec le modèle de plage de dépôt

3.4 Essais et mesures

Les caractéristiques des différents essais réalisés sont regroupés dans le Tableau 3-3. Les largeurs de fente ont été prises environ égales à un multiple de 12 mm qui correspond environ au diamètre maximum de notre matériau. Pour être précis, il s'agit du diamètre D_{98} . Les largeurs de fente retenues sont 2,4 – 3,6 – 4,8 et 10 cm. Le cas « sans ouvrage » avec le seul élargissement en réalité avec une largeur de 50 cm a également été traité. Quelques essais avec une fente munie d'une grille à barreaux horizontaux ont été considérés.

Il a été décidé d'effectuer les essais en régime permanent afin de bien décortiquer les processus en jeu. Deux essais avec deux paliers de débit ont néanmoins été réalisés.

De nombreux essais ont été menés avec un débit liquide de 1,6 l/s et un débit solide apparent de 0,13 l/s (densité de 1,65) ce qui donne une concentration réelle de 5 % (débit solide rapporté au débit liquide). Des essais pour une concentration réelle de 3,6 et 10 % ont également été réalisés. On se reportera à l'annexe C pour la définition des densités, volumes, et concentrations réelles ou apparentes.

Chaque essai est répété au moins deux fois. Pour plus de détails sur la conduite de l'expérience et les essais réalisés, on se reportera à Tannou (1999).

Largeur de fente en cm	Débit liquide en l/s	Débit solide apparent en l/s	Concentration réelle en %	Remarques
1,8	1,6	0,13	5	Test blocage mécanique
2,4	1,6	0,13	5	
3,6	2,3	0,13	3,6	
3,6	1,6	0,13	5	
3,6	2,3	0,18	5	
3,6	0,8	0,13	10	
3,6	1,6	0,13	5	Pente initiale de 13%
3,6	1,6-2,3-0,8	0,13-0,18-0,13	5	Changement de débit
3,6	2,3/1,6	0,18/0,13	5	Réduction de débit
3+3,6+3	1,6	0,13	5	Grilles sur fentes latérales
4,8	1,6	0,13	5	
4,8+grille 1,5 D_{98}	1,6	0,13	5	Blocage mécanique
10	1,6	0,13	5	
10+grille 1,5 D_{98}	1,6	0,13	5	Blocage mécanique
10+grille 2 D_{98}	1,6	0,13	5	
50	1,6	0,13	5	« sans fente »

Tableau 3-3 : les différents essais réalisés

Les variables mesurées au pas de temps d'une minute sont les débits solides sortants et les cotes de réglets dans la plage. Les débits solides sortants ont été obtenus à partir d'un volume apparent mesuré au seau. Les hauteurs d'eau claire ou de mélange à l'immédiat amont de la fente ont également été mesurées. Enfin différents temps particuliers ont été relevés (entrée amont et sortie aval du débit solide). A partir de ces données brutes, il a été possible de calculer les volumes accumulés dans la plage et les pentes du profil en long. Le détail de ces mesures et calculs et leurs incertitudes correspondantes sont reportés en annexe C.

4 Analyse des résultats expérimentaux

4.1 Blocage mécanique

Nous avons préalablement vérifié les conditions de blocage de l'ouverture par les matériaux. Nous avons vérifié les critères bien connus relatifs à la largeur d'une ouverture par rapport au diamètre maximum des matériaux (par exemple Ikeya, 1985) :

- Si largeur $< 1,5 D_{max}$: toujours blocage
- Si largeur $< 2 D_{max}$: possibilité de blocage.

Notons que la définition du diamètre maximal D_{max} n'est pas aisée à partir de la courbe granulométrique. Nous caractériserons la taille maximale de notre matériau par le $D_{98} = 12$ mm.

Les expériences menées avec une fente de 1,8 cm correspondant à $1,5.D_{98}$ se sont toutes soldées par un blocage mécanique, généralement initié par l'arrivée simultanée de deux particules de taille proche de la maximale. En revanche, seules deux expériences sur 6 dans le cas de la fente de 2,4 cm ($2D_{98}$) se sont bouchées.

Ces critères sont également valables en ce qui concerne l'écartement minimum d'une grille. Une grille d'écartement $1,5 D_{98}$ a été appliquée aux fentes de 4,8 et 10 cm. Le blocage a été systématiquement observé. En revanche, un écartement de $2D_{98}$ n'a pas engendré de blocage.

Puisque nous souhaitons une conception des plages de dépôt qui évite le blocage, la plupart des essais ont été réalisés pour une largeur de fente supérieure à deux fois le diamètre maximum.

4.2 Description sommaire du stockage et du transit de la charge solide

L'évolution du débit solide sortant et du volume déposé dans la plage apparaît sur les graphiques de la Figure 4-1 pour deux essais effectués avec la fente de 3,6 cm. Cette figure illustre en premier lieu la variabilité obtenue pour une même configuration. Elle permet ensuite d'appréhender le fonctionnement de la plage de dépôt munie d'une fente unique. Trois phases se distinguent :

- Un dépôt dans la plage sans débit solide sortant : on note une avancée régulière du dépôt solide constitué en avant d'un front raide ; des divagations des chenaux d'écoulement se produisent dès les premiers instants avec de légères différences latérales dans

l'avancement du front ; cet avancement semble contrôlé par le niveau de la surface libre de la zone d' « eau morte » provoquée par la fente que nous appellerons encore réservoir ou « baignoire » ;

- Une augmentation rapide du débit solide avec toujours un dépôt dans la plage lorsque le front atteint le point situé environ 10 cm en amont de la fente et que se développe un cône d'aspiration ;
- Un débit solide sortant proche du débit entrant et un volume de la plage se rapprochant ou oscillant autour d'une pente d'équilibre².

Ce fonctionnement peut être qualifié de « tout ou rien » dans la mesure où s'écoule en sortie le débit d'eau claire amont suivi presque sans transition des mêmes débits solides et liquides qu'à l'amont.

L'ensemble des résultats obtenus pour les diverses fentes et les diverses concentrations sont portés en annexe B.

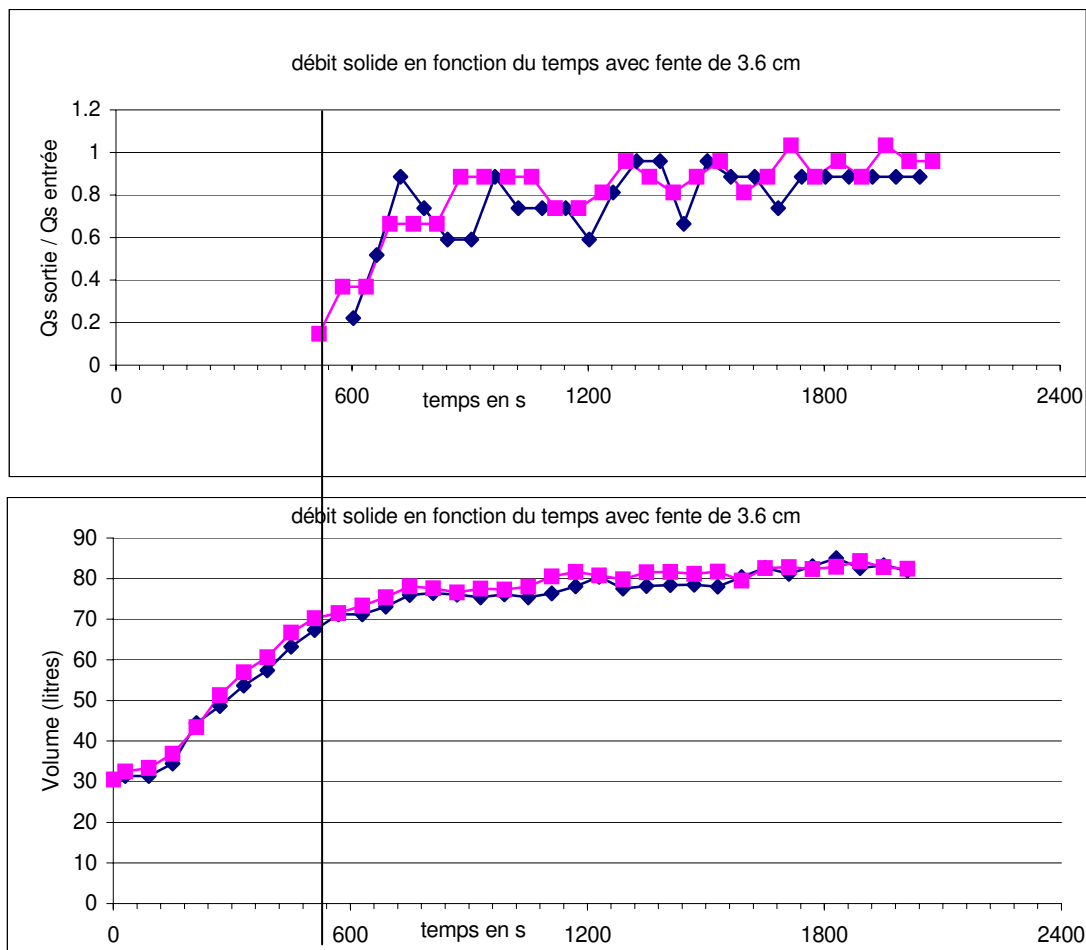


Figure 4-1 : Superposition du volume stocké dans la plage et des débits solides sortant en fonction du temps pour deux expériences répétées avec fente de 3,6 cm,

² Nous utiliserons indifféremment les termes de pente d'équilibre, pente d'atterrissement ou de pente finale

4.3 Volumes à l'équilibre

Les volumes à l'équilibre sont calculés à l'aide des neuf réglets régulièrement disposés dans la plage (voir annexe C pour le détail du calcul et l'incertitude correspondante). Il ne s'agit que du volume apparent compris entre les réglets amont et la fente (90 cm de longueur). Par ailleurs, il s'agit du volume compté à partir du fond du canal y-compris le volume disposé au début de l'expérience. En effet, pour des raisons expérimentales, le volume initial de l'ordre de 30 litres est susceptible de varier. Ce point ne pose pas vraiment problème d'autant plus que nous verrons que le volume final ne dépend pas du volume initial donc pas davantage de la pente initiale qui a cependant été fixée à environ 3 % dans nos expériences.

Nous avons choisi de présenter des données de volume non adimensionnalisées. Rappelons qu'en choisissant un facteur d'échelle entre $1/50^e$ et $1/80^e$, il est possible grâce à la similitude de Froude de retrouver bon nombre de plages de dépôt typiques. Par ailleurs, nous verrons que le volume final se retrouve aisément à partir du profil en long d'équilibre lui-même fonction de la hauteur d'eau en amont de la fente (contrôlé par le débit liquide) et de la pente d'équilibre (essentiellement contrôlée par la concentration).

Les volumes de stockage à l'équilibre sont d'autant plus élevés que la fente de l'ouvrage aval est étroite (voir Figure 4-2). Ceci n'est pas une surprise dans la mesure où une fente plus étroite entraîne une perte de charge singulière plus élevée, donc une élévation amont de la ligne d'eau plus importante et in fine un stockage plus conséquent. Ce point sera traité plus en détail en 4.5.1. Par ailleurs, le cas de la fente de 2,4 cm illustre le fait que le volume initial n'a pas d'influence sur le volume final puisqu'en partant de volumes initiaux sensiblement différents de 18 et 30 l, on aboutit au même volume final de l'ordre de 85 litres.

L'influence de la concentration apparaît sur la Figure 4-3. Le volume stocké avec la concentration amont réelle de 10 % (débit liquide : 0,8 l/s, débit solide apparent : 0,13 l/s) est plus élevé que pour la concentration réelle de 5 %. (débit liquide : 1,6 l/s, débit solide apparent : 0,13 l/s) et ce malgré un débit liquide et donc une hauteur d'eau plus faible. Une forte concentration implique en effet une pente d'équilibre plus élevée et partant un volume stocké plus important (voir Figure 4-3).

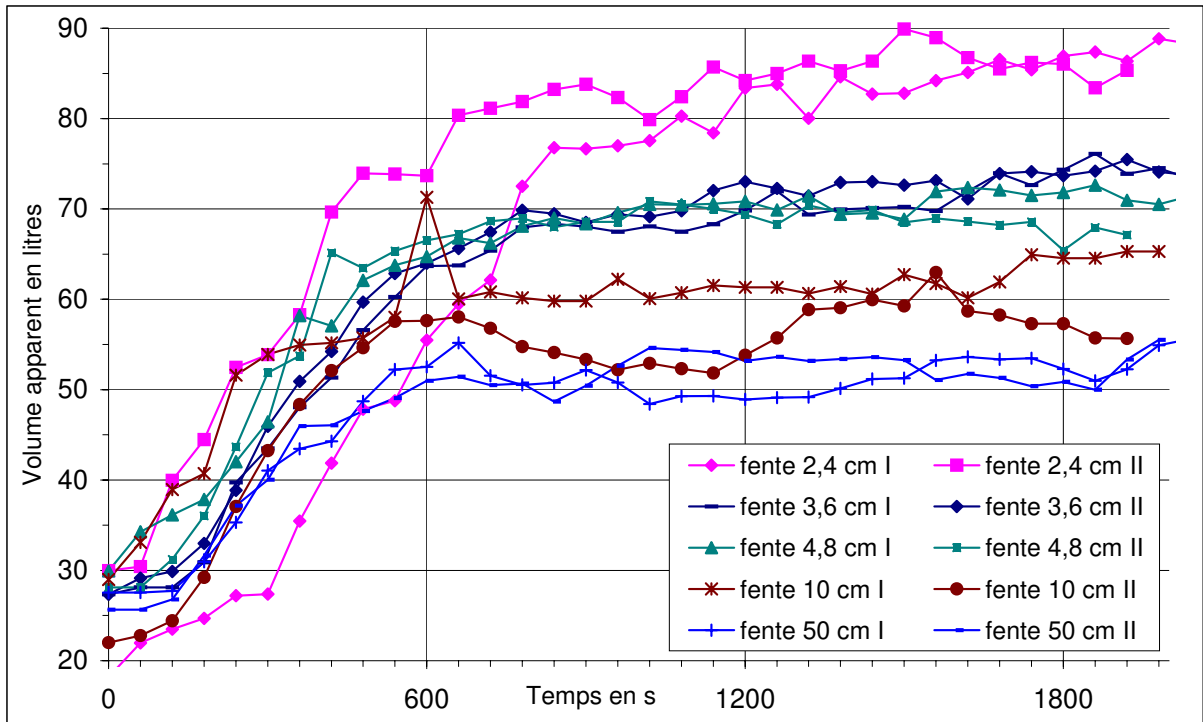


Figure 4-2 : Volume de stockage de la plage de dépôt en fonction de la largeur de fente.

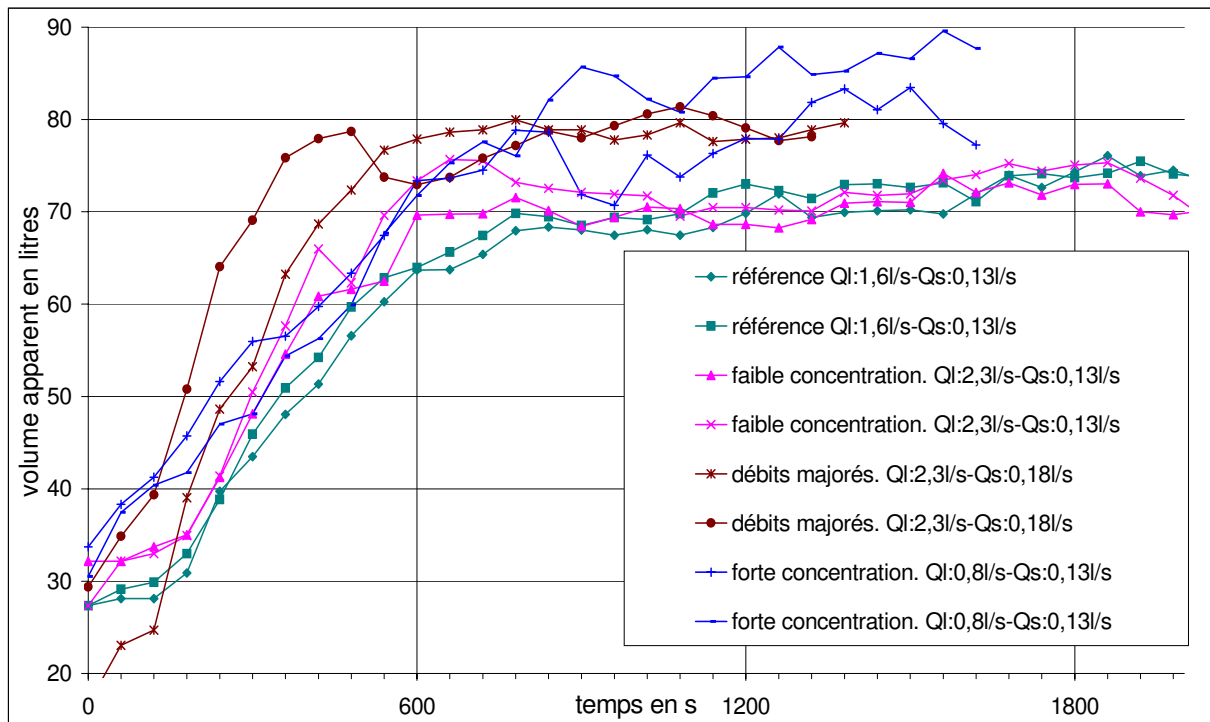


Figure 4-3 : Volume de stockage de la plage de dépôt en fonction de la concentration.

4.4 Débits solides sortants

Si le temps d'apparition du débit solide est directement lié au volume stocké dans la plage et donc à la largeur de la fente (voir Figure 4-4), l'évolution ultérieure du débit solide semble en revanche indépendante de cette largeur.

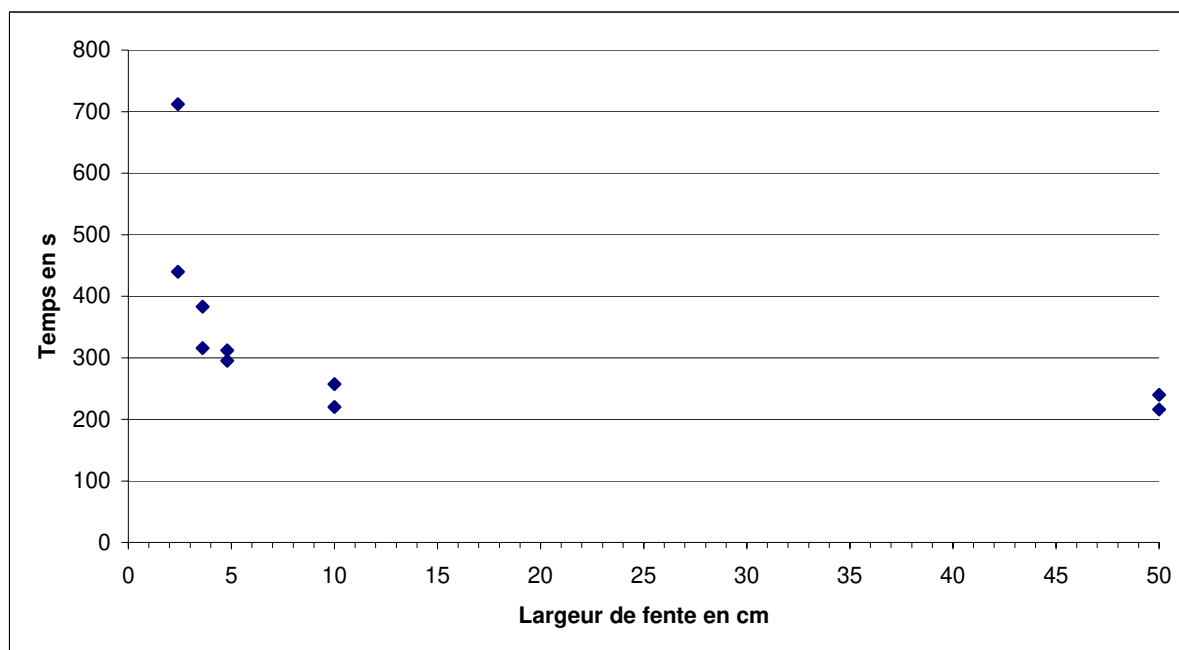


Figure 4-4 : Temps de début de débit solide en sortie de plage de dépôt pour les diverses fentes.

Il a été constaté dans la quasi-totalité des essais que la plage de dépôt est toujours remplie à environ 70-80% au moment de l'apparition du débit solide en sortie quelles que soient la largeur de l'écoulement et la concentration. Le fait que la plage de dépôt continue à se remplir alors qu'un débit solide apparaît en sortie est expliqué par les deux éléments suivants :

- lorsque le front solide atteint la fente, une certaine élévation du niveau d'eau a lieu (voir 4.5.2) qui entraîne un stockage supplémentaire dans la plage ;
- le front solide n'est pas uniformément réparti sur toute la largeur si bien qu'un stockage peut avoir lieu par exemple sur les côtés alors que le cône d'aspiration est déjà développé au centre.

L'analyse de la phase de montée du débit solide apparaît sur la Figure 4-5 qui présente la moyenne et l'écart-type de la variation de débit sur un pas de temps (1minute), normalisée par le débit d'entrée. On peut constater que la variabilité pour un même essai est aussi importante que d'une largeur à l'autre. Il en est de même lorsque la concentration varie.

Outre les conditions de divagation, la variabilité durant la phase de montée est également attribuée à la position du front solide par rapport à la fente (de face ou sur les côtés).

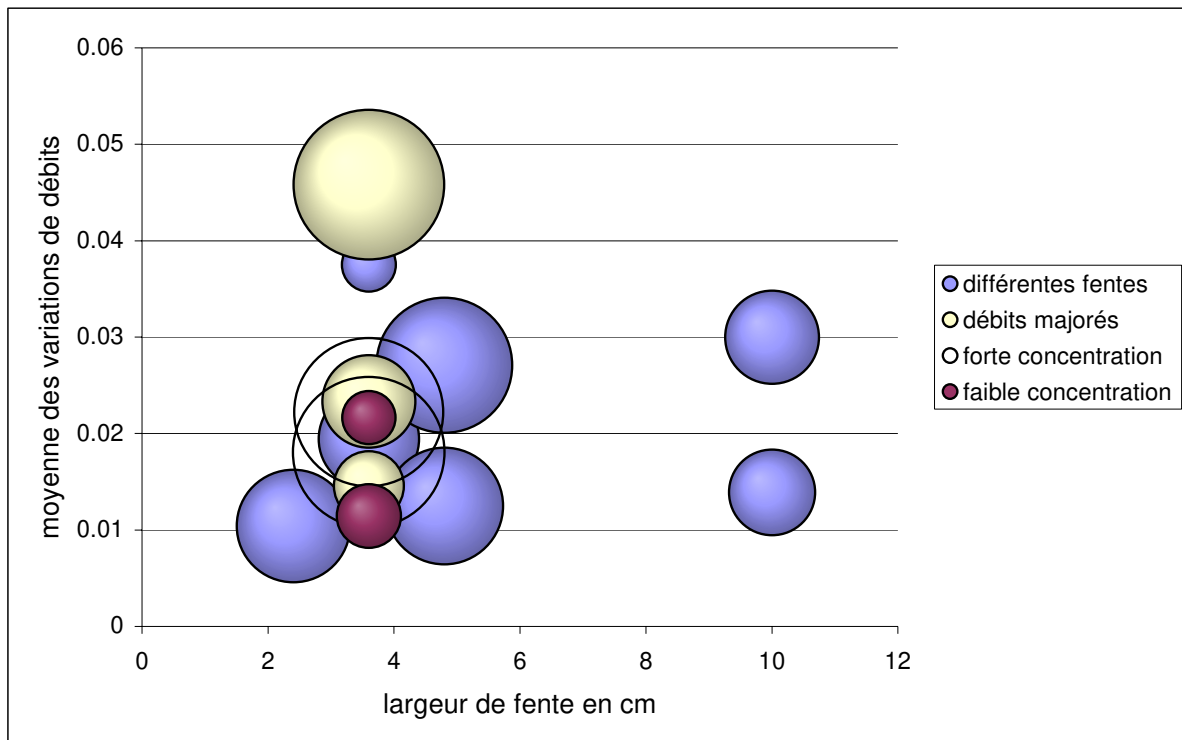


Figure 4-5 : moyenne et écart type des pentes des débits sortants pour plusieurs fentes et plusieurs concentrations,

Lorsque le débit solide sortant approche du débit solide entrant (palier), On peut noter des différences dans les variations du débit solide selon la largeur de fente ou la concentration (voir annexe B). Aucune explication évidente n'a pu être trouvée. Tout au plus, peut-on attribuer cette variabilité aux différentes conditions de divagations des chenaux d'écoulement dans la plage.

En conclusion, l'évolution globale du débit solide sortant ne dépend ni de la largeur de fente ni de la concentration. Seul le temps d'apparition du débit solide en sortie est relié à ces paramètres.

4.5 Profil en long final

Les données obtenues sur les volumes déposés tendent à montrer que la hauteur d'eau d'une part et la concentration par l'intermédiaire de la pente d'équilibre d'autre part sont les principales variables de contrôle du dépôt. Nous consacrons donc les prochains paragraphes à l'étude de ces deux variables.

4.5.1 Hauteurs d'eau claire à l'amont de la fente

Une première série d'expérience a été menée sans transport solide en « eau claire ». La hauteur d'eau h a été étudiée en fonction du débit Q pour vérifier les lois de type déversoir pour toutes les largeurs l de fente :

$$Q = \mu l \sqrt{2gh}^{\frac{3}{2}}$$

Les données sont regroupées en annexe B. Le coefficient $3/2$ a été retrouvé par régression linéaire. Une certaine variabilité de ce coefficient est observée qui s'explique par l'incertitude sur la mesure de la hauteur notamment à faible débit. Le coefficient de débit μ apparaît dans le Tableau 4-1. Bien que l'on ne soit plus dans les conditions d'utilisation de la formule du déversoir, nous y avons également inclus le cas « sans fente » en réalité une largeur de 50 cm car on y observe également un passage fluvial/torrentiel. Cependant, cette fente est en régime noyé car la hauteur du bief aval exerce une influence non négligeable ce qui explique un coefficient de débit nettement plus faible que dans les autres cas.

Les coefficients de débit de toutes les autres fentes sont particulièrement élevés par rapport à une valeur usuelle d'environ 0,4 pour les déversoirs. L'explication réside dans la contraction de l'écoulement qui est aisément observée bien que difficile à mesurer. En pratique cela revient à appliquer la formule avec la largeur contractée d'où un coefficient μ plus élevé si la largeur de la fente est utilisée. Cette contraction est particulièrement marquée expérimentalement pour la fente de 2,4 cm ce qui est corroboré par la valeur la plus élevée du coefficient μ .

En fait, la fente a un comportement intermédiaire entre le déversoir et l'orifice pour lequel une valeur de coefficient de débit de 0,6 est couramment rencontrée.

Largeur de fente	2.4 cm	3.6 cm	4.8 cm	10 cm	50 cm
μ	0,58	0,49	0,51	0,52	0,27

Tableau 4-1 : coefficient de débit

Deux essais ont également été réalisés avec des fentes munies d'une grille (4,8 cm et 10 cm). On constate évidemment, à débit constant, une élévation du niveau d'eau par rapport à la fente sans grille. Il est envisageable d'utiliser la relation du déversoir avec une section mouillée diminuée de la section des barreaux. Il semble cependant plus précis de considérer la grille comme une somme d'orifices (entre les barreaux) et d'un déversoir constitué du barreau le plus haut. Cette méthode est également discutable car les orifices ne sont pas découplés hydrauliquement. Plus prosaïquement, quelles que soient les formulations, ce sont les conditions de contraction qui vont gouverner la loi de débit. Nous proposons sur la Figure 4-6, la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux avec ou sans grille pour la fente de 4,8 cm. Pour la grille nous avons représenté la formule du déversoir avec section réduite et avec le même coefficient de débit que celui calé sur la fente sans grille ($\mu=0,51$). Compte tenu des incertitudes sur les hauteurs d'eau mesurées, cette dernière formule rend assez bien compte des résultats expérimentaux.

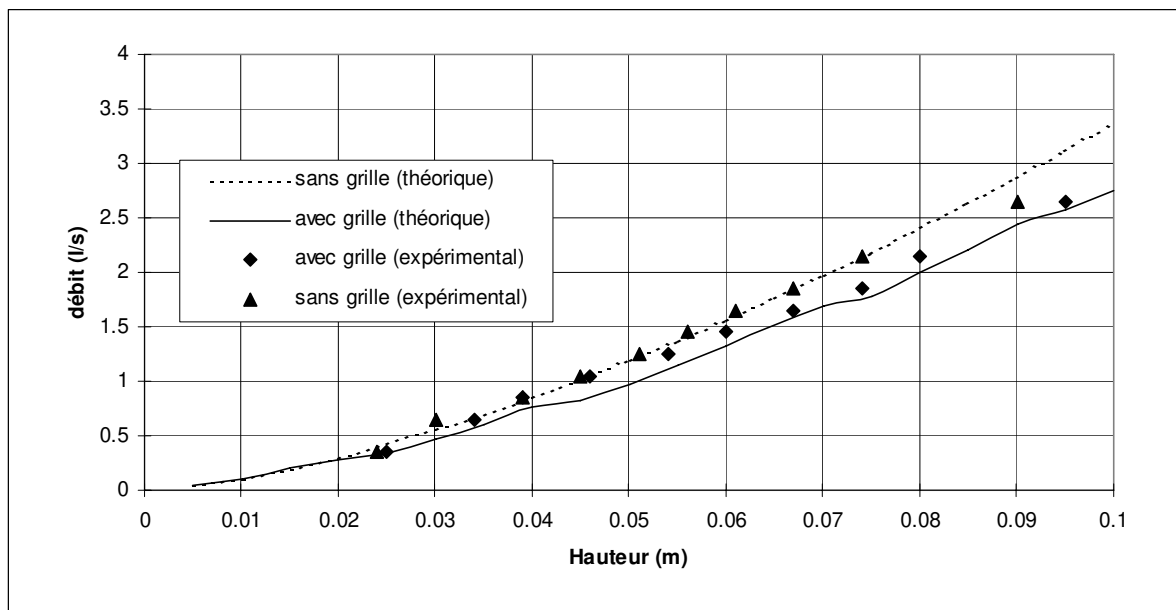


Figure 4-6 : Loi débit/hauteur pour la fente avec et sans grille. Comparaison avec l'expérience

4.5.2 Hauteur de mélange

Lorsque le front solide atteint la fente et qu'un débit solide commence à sortir, la hauteur de l'écoulement aussi appelée hauteur de mélange (sous-entendu mélange d'eau et de solide) augmente.

Selon les expériences, cette augmentation est brutale ou bien plus progressive. Nous n'avons pas étudié ce point mais nous avons mesuré les hauteurs de mélange lorsque le débit solide en sortie avait atteint le palier et que le cône d'aspiration était bien établi. Même dans ce cas, on observe une grande variabilité dans les hauteurs de mélange attribuée au caractère aléatoire des divagations qui dirige l'écoulement soit directement dans l'axe de la fente soit plutôt sur les cotés (voir Tableau 4-2). Ainsi, par exemple, dans le cas de la fente de 3,6 cm, on a pu mesurer des hauteurs de mélange sensiblement différentes de 8,5 et 10,1 cm comparées à la hauteur en eau claire de 7,5 cm. Il semble également que le rapport des hauteurs eau claire/mélange diminue lorsque la fente augmente.

Mentionnons sur le sujet les travaux de Smart et Jaeggi (1983) qui proposent une formule liant la hauteur de mélange à la hauteur en eau claire. Cette formule établie en régime uniforme n'est pas adaptée au cas de notre écoulement fortement instable dans le cône d'aspiration.

L'examen du tableau montre curieusement que l'on peut retrouver la plupart des valeurs de hauteur de mélange en ajoutant le diamètre maximum des particules de 12 mm à la hauteur en eau claire. Il s'agirait alors essentiellement d'une question d'encombrement provoqué par la phase solide. Cette remarque reste hypothétique et serait à vérifier dans le futur.

Largeur de fente en cm	Heau claire	Hmélange	h _{eau claire} /h _{mélange}
2,4	9	10,0	0,90
2,4	9	10,2	0,88
3,6	7,5	10,1	0,743
3,6	7,5	8,5	0,88
4,8	6,1	6,9	0,885
4,8	6,1	7,3	0,831
10	3,8	5,5	0,69
10	3,8	5,5	0,69

Tableau 4-2: Hauteur de mélange comparée à la hauteur en eau claire pour différentes largeurs de fente.

4.5.3 Pentés d'atterrissement

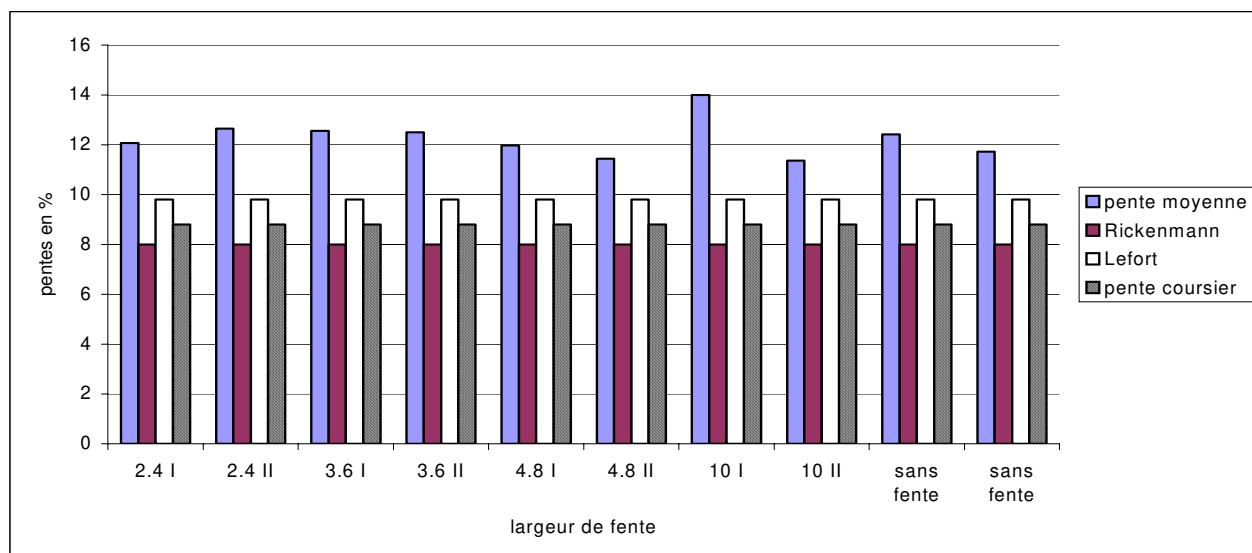


Figure 4-7 : Pentés d'équilibre pour une concentration réelle de 5%

Les pentes moyennes calculées à partir des réglés (voir annexe C) sont portées sur la Figure 4-7. On peut constater qu'elles ne dépendent pas de la largeur de fente et valent environ 12 % à l'exception du premier essai avec la fente de 10 cm considéré comme non représentatif. La concentration réelle de tous ces essais est de 5%. Nous avons également reporté la pente mesurée sur le coursier amont qui vaut 9 %. Elles sont comparées avec le résultat des formules de Rickenmann et de Lefort largement utilisées en France dans le domaine torrentiel. Nous pouvons constater que ces formules prédisent correctement la pente mesurée dans le coursier amont comme attendu puisque l'on se situe dans leur domaine de validité. En revanche, ces formules ne sont pas valables lorsque l'écoulement n'est plus confiné et divague comme c'est le cas dans la plage de dépôt.

Il est cependant bien connu (Lala Rakotoson, 1994 ; Eroslope, 1996) qu'en cas de divagations, pour une pente d'équilibre donnée, la concentration est plus faible et plus fluctuante que dans un écoulement occupant toute la largeur du chenal. Inversement, pour une concentration donnée, la pente d'équilibre sera plus forte dans une zone de divagations.

Nos mesures de pente (12 % au lieu de 9 %) sont donc en accord avec les résultats antérieurs.

L'influence de la concentration apparaît sur la Figure 4-8. La variation de la concentration a été obtenue à débit solide constant en faisant varier le débit liquide.

La faible concentration correspond donc à un débit plus élevé et vice-versa. Un essai a également été effectué à même concentration mais avec majoration des débits solides et liquides. Comme attendu, la pente est d'autant plus élevée que la concentration est forte. On obtient plus de 20 % pour une concentration de 10 %. Le cas des débits majorés est intéressant car à même concentration, on mesure une pente plus faible. L'explication probable tient au débit liquide plus élevé qui réduit les divagations dans la plage. Cet argument permet aussi d'expliquer que les formules ne donnent de bons résultats que pour le débit le plus élevé (faible concentration et débit majoré). Il faut noter que ces formules prennent en partie en compte ce phénomène par l'intermédiaire du terme seuil, rapport entre le débit critique de début de mouvement et le débit liquide. On peut l'observer sur la figure car les pentes calculées augmentent légèrement lorsque le débit diminue à même concentration mais dans une proportion très faible par rapport à la réalité des mesures. Des éléments supplémentaires sur les régimes instables divagants peuvent être trouvés dans Alexandre (1997) et les processus de charriage dans le cas de débits liquides proches du seuil de début de mouvement font actuellement l'objet d'un travail de thèse au Cemagref (F. Bigillon)

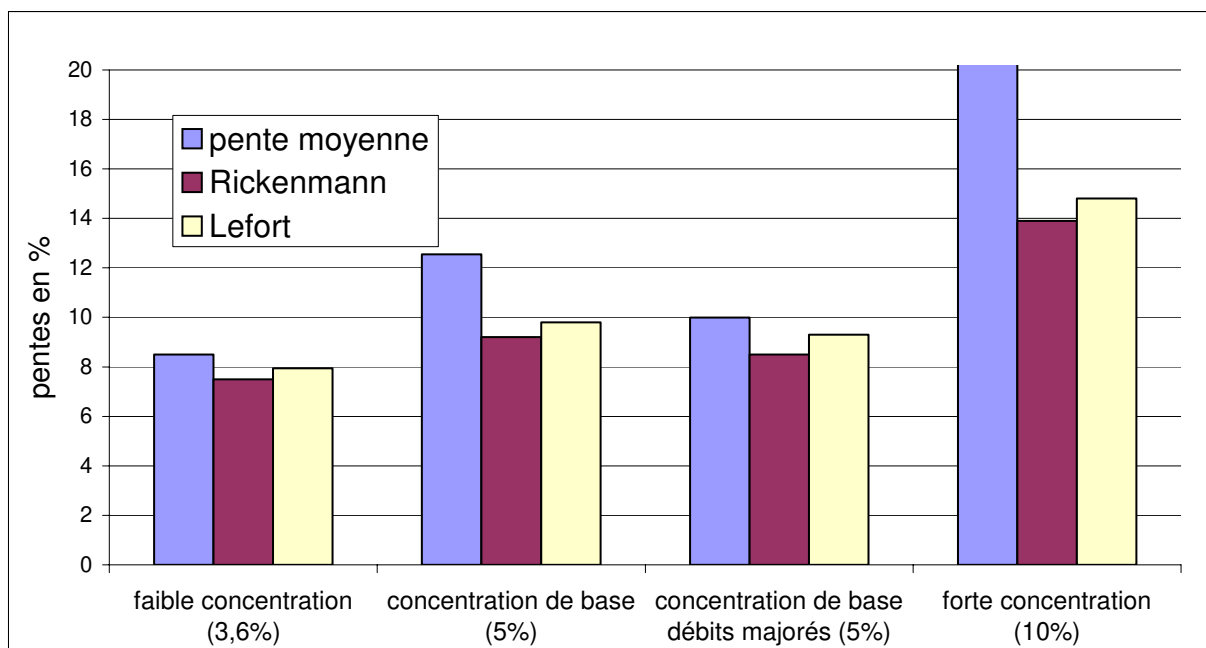


Figure 4-8 : Pente d'équilibre pour des concentrations réelles de 3,6 5 et 10 %

En conclusion, la pente d'atterrissement ne dépend pas de la largeur de fente mais bien, comme attendu, de la concentration. En outre, le régime instable divagant qui a généralement lieu dans la plage de dépôt oblige à tenir compte de la vigueur du débit liquide. Le rapport débit critique de début de mouvement sur débit liquide est sans doute un paramètre de choix mais aucune formulation n'est cependant disponible pour estimer la pente d'équilibre en régime divagant. Les formules usuelles restent cependant utiles car elles fournissent la borne inférieure de cette pente d'équilibre.

4.5.4 Calcul théorique du volume final

La connaissance de la hauteur de mélange et des pentes d'atterrissement permet le calcul du volume de matériau stocké par un simple calcul d'aire (voir Figure 4-9). La Figure 4-10 montre que les volumes calculés et expérimentaux sont en très bon accord compte tenu des incertitudes sur le volume expérimental.

Ceci confirme le rôle clé de la hauteur de mélange et de la concentration dans le fonctionnement de la plage de dépôt.

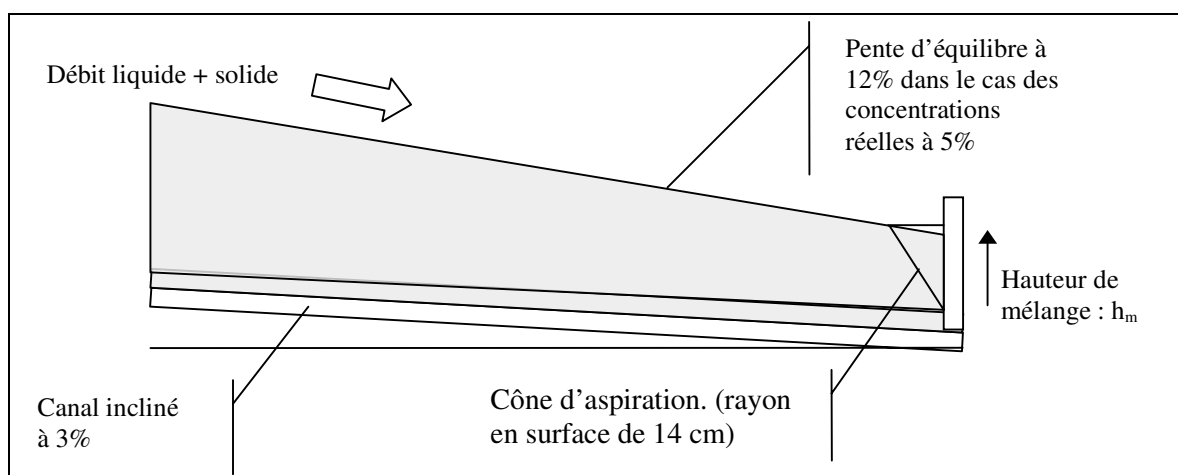


Figure 4-9 : schéma de principe pour le calcul du volume d'équilibre théorique

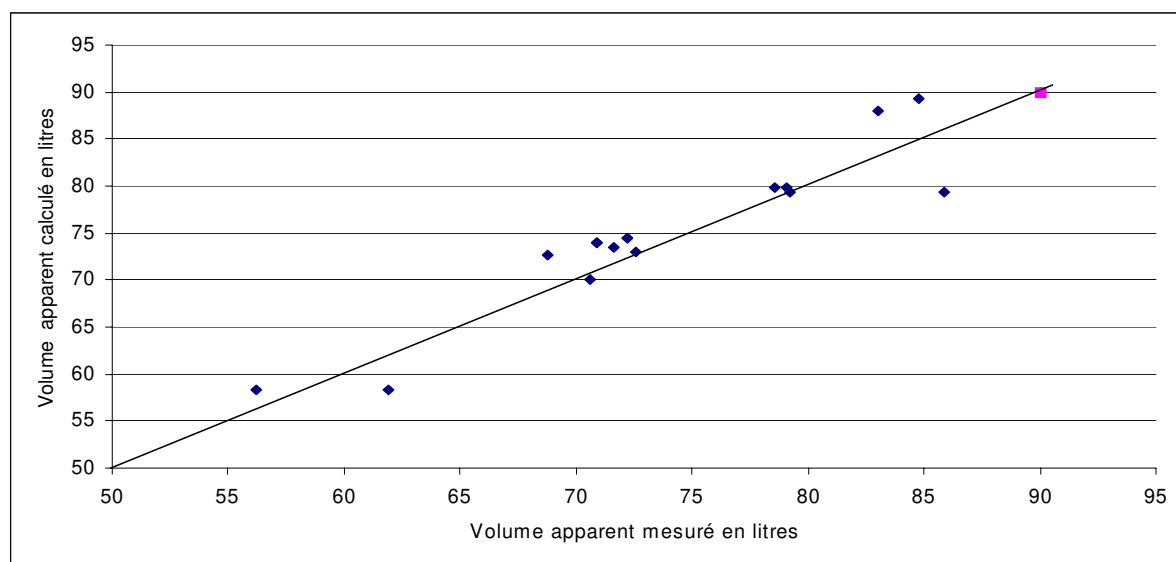


Figure 4-10 : comparaison volume maximum expérimental et calculé pour toutes les largeurs de fentes et toutes les concentrations

4.6 Avancée du front

Les cotes des réglets disposés dans la plage de dépôt permettent d'accéder aux volumes et aux pentes globales et n'ont été relevées que toutes les minutes. Pour analyser l'avancée du front plus précisément, nous avons réalisé dans le cas de la fente de 2,4 cm une expérience spécifique en disposant 5 réglets espacés de 13 cm et relevés toutes les 30 secondes. L'analyse des données (voir annexe D) permet de proposer Le fonctionnement expliqué sur la Figure 4-11.

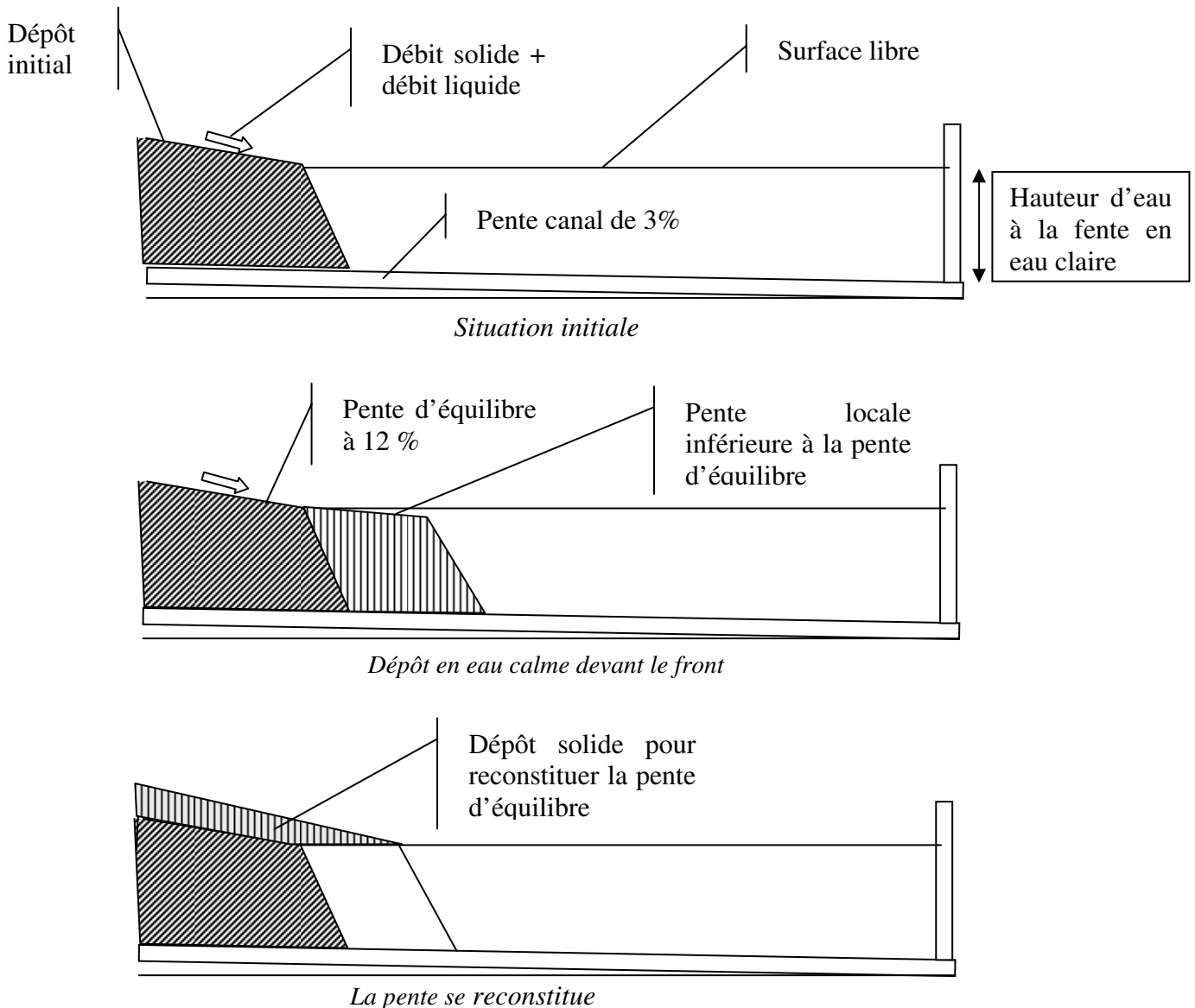


Figure 4-11 : analyse conceptuelle du remplissage

Lorsque le matériau arrive dans le réservoir à vitesse quasi-nulle, il s'accumule à l'avant du front jusqu'à rejoindre la surface libre avec une pente très faible favorisant donc la sédimentation. On se retrouve dans le cas d'une rupture de pente avec le bief aval se comblant

pour atteindre à nouveau la pente d'équilibre. Globalement, on assiste à une translation du profil constitué du tronçon à la pente d'équilibre et du front raide.

Dans la réalité, les deux phénomènes (accumulation et constitution de la pente d'équilibre) ont lieu en même temps et il n'est pas aisé de les séparer.

A partir de cette analyse conceptuelle, il est possible connaissant la hauteur d'eau, la pente (directement liée à la concentration) et le volume apporté à chaque pas de temps de déterminer l'avancée du front à chaque instant. Ce calcul a été réalisé en considérant pour simplifier un front vertical (voir annexe D).

Pour valider ce calcul, les temps expérimentaux et calculés d'apparition du débit solide en sortie ont été comparés de façon satisfaisante compte tenu de la variabilité des temps mesurés (Figure 4-12).

Cette analyse conceptuelle devrait permettre à l'avenir une modélisation numérique simplifiée du profil en long avec comme paramètres d'entrée les hauteurs d'eau et les pentes d'équilibre dont la détermination en cas de divagations reste délicate.

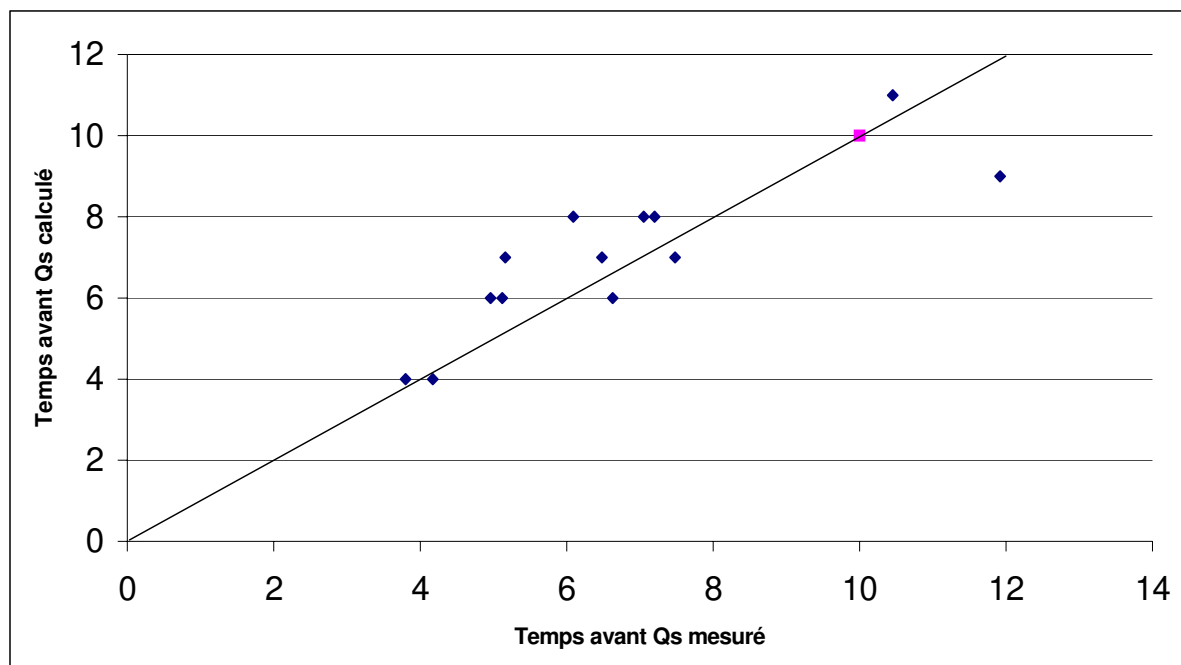


Figure 4-12 : Comparaison des durées calculées et mesurées d'apparition du débit solide en sortie.

4.7 Changement de débit durant l'essai

Une expérience avec trois paliers de débit a été effectuée afin d'approcher le comportement de la plage en régime transitoire. La même concentration réelle de 5 % est conservée tout le long de l'expérience. Le Tableau 4-3 détaille l'hydrogramme entrant.

Temps (min)	0 à 8	8 à 13	13 à 20
Débit liquide l/s	1,6	2,3	1,6
Débit solide apparent l/s	0,13	0,18	0,13

Tableau 4-3 : les trois paliers de débits en entrée

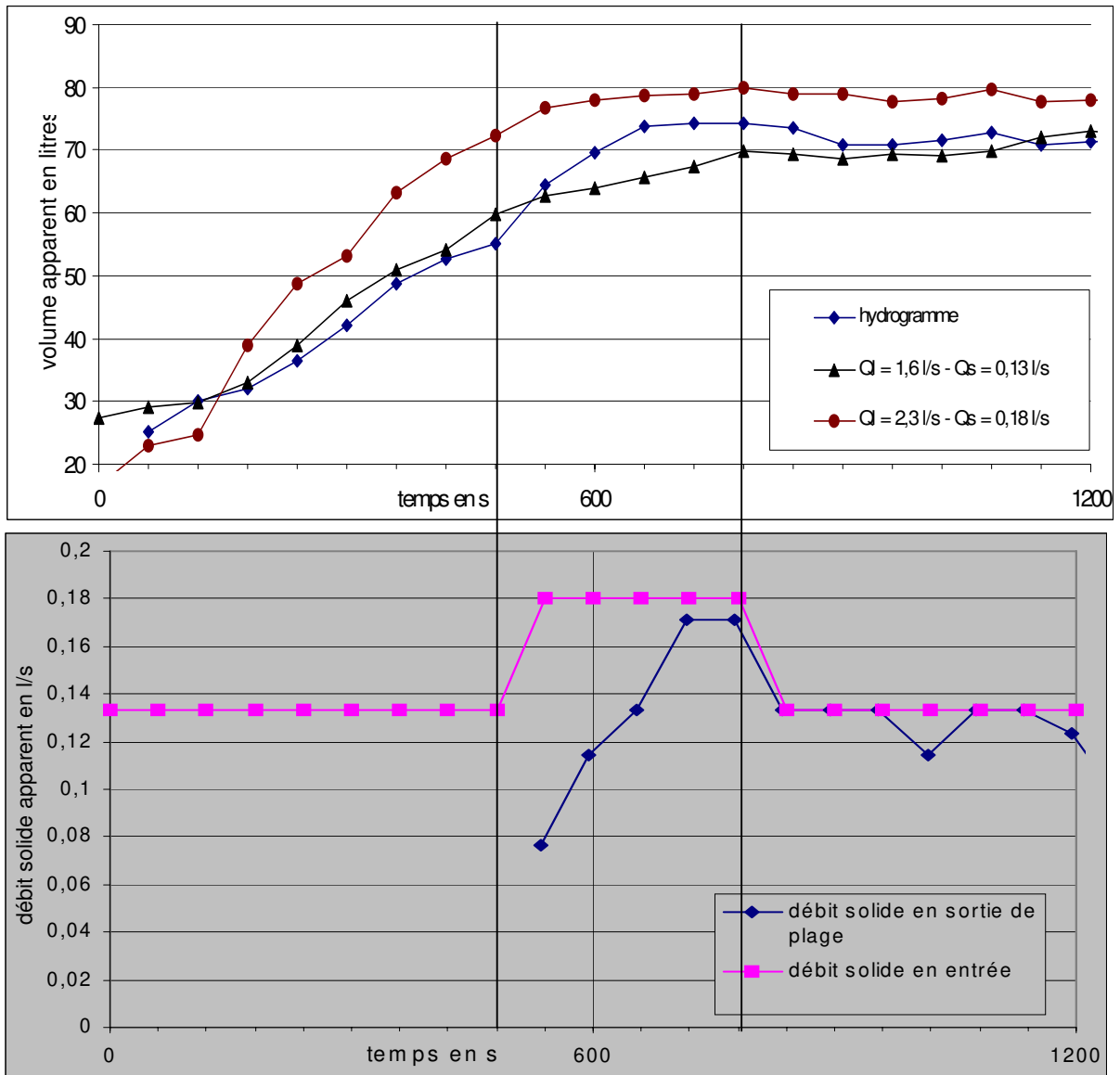


Figure 4-13 : Changement de débit : Volumes de dépôt dans la plage ; débits solides entrants et sortants (fente de 3,6 cm)

Au départ, l'observation des volumes déposés (Figure 4-13) montre évidemment un comportement identique au régime constant de 1,6 l/s. L'augmentation brusque du débit entraîne un dépôt plus important qui tend à rejoindre la courbe du régime constant de 2,3 l/s. A peu près au même moment, un débit solide sortant apparaît qui rejoint en trois minutes le débit maximal de 2,3 l/s. Cette montée brusque du débit s'explique par une différence de volume stockable somme toute assez faible entre le débit de 1,6 l/s et 2,3 l/s. En effet, la hauteur d'eau à la fente n'augmente que de 2 cm passant de 6,6 à 8,5 cm d'où un volume de stockage supplémentaire assez faible d'environ 10 l.

Lorsque le débit est brusquement réduit, le volume stocké diminue pour atteindre à nouveau la courbe des volumes de 1,6 l/s. Le débit revient rapidement à sa valeur d'entrée car la plage est déjà pleine et le déstockage est faible.

Pour conclure, cette expérience montre que pour avoir à la fois sortie de débit solide et remplissage supplémentaire, il faudrait trouver un ouvrage imposant une montée plus importante et rapide de la hauteur d'eau lorsque le débit augmente et que la plage de dépôt est déjà bien pleine.

5 Discussion

A l'issue de l'analyse assez détaillée des résultats expérimentaux, nous avons vu que la fente unique munie ou non de grilles impose un comportement « tout ou rien » avec un remplissage contrôlé par la hauteur d'eau du réservoir jusqu'à atteindre la pente d'équilibre. Ce remplissage est quasiment terminé lorsqu'apparaît le débit solide en sortie qui atteint rapidement sa valeur d'entrée.

Ce fonctionnement répond parfaitement à la fonction première d'une plage de dépôt qui est de retenir tout ou partie des matériaux solides.

Il est en revanche antagoniste avec l'objectif de laisser passer une fraction des matériaux solides pour éviter l'affouillement en aval. En effet, au départ une grande quantité d'eau claire s'écoule suivie, si la plage est remplie, d'un débit solide égal au débit amont qui ne peut généralement pas être accueilli par le chenal aval (sinon la plage de dépôt ne serait pas justifiée).

Il est vrai que la plupart de nos essais a été effectuée à débits liquide et solide constants. Les essais avec deux paliers de débit nous ont néanmoins donné une bonne idée du fonctionnement en régime transitoire.

La quasi-totalité des plages de dépôt existantes munies de fentes avec grilles ne permet donc pas de répondre à l'objectif quelles que soient les largeurs de fentes et écartements de grilles.

Il semble que l'ouvrage aval ne peut pas à lui seul résoudre le problème. Il est sans doute nécessaire de prévoir une conception adaptée de l'ensemble zone de dépôt et ouvrage terminal.

5.1 Forme et modelé de la plage

A ce stade, il faut mentionner deux sous-problèmes sensiblement distincts :

- l'accumulation dans la plage des charges solides apportées par des petites crues qui pourraient transiter sans dommage à l'aval : ce problème n'est pas à négliger puisque, outre un curage inutile, il entraîne à la longue un déficit en matériau susceptible d'entraîner un abaissement progressif du lit ;
- L'événement catastrophique de faible fréquence qui remplit en une fois la plage de dépôt et fournit à l'aval un débit liquide considérable susceptible de provoquer des affouillements

dangereux en particulier pour les ouvrages de protection et de franchissement : ce problème est à traiter en priorité.

Le premier problème semble pouvoir être résolu en assurant la continuité hydraulique pour les faibles crues. Une idée serait de réaliser un lit mineur dans la zone de dépôt comme indiqué sur la Figure 5-1.

Il faut mentionner ici la plage de dépôt latérale constituée d'une zone de dépôt placée latéralement au chenal d'écoulement ordinaire par opposition aux plages que nous avons étudiées appelées alors « en série ». Un ouvrage déversant permet au-dessus d'une certaine cote de recueillir le matériau dans la zone de dépôt latérale lui-même fermé par un ouvrage terminal qui ramène les écoulements dans le chenal plus en aval. Cet ouvrage semble très adapté au premier problème (succession de petites crues). Lors d'une grosse crue, il est cependant probable que le problème des forts débits d'eau claire réinjectés dans le chenal aval se pose de la même façon que pour la plage de dépôt en série. Dans les deux cas, il faut essayer de trouver un nouveau type de modelé de la zone de dépôt qu'elle soit en série ou latérale ainsi qu'un nouveau type d'ouvrage aval. La plage de dépôt latérale doit bien entendu occuper une place de choix dans les expérimentations futures.

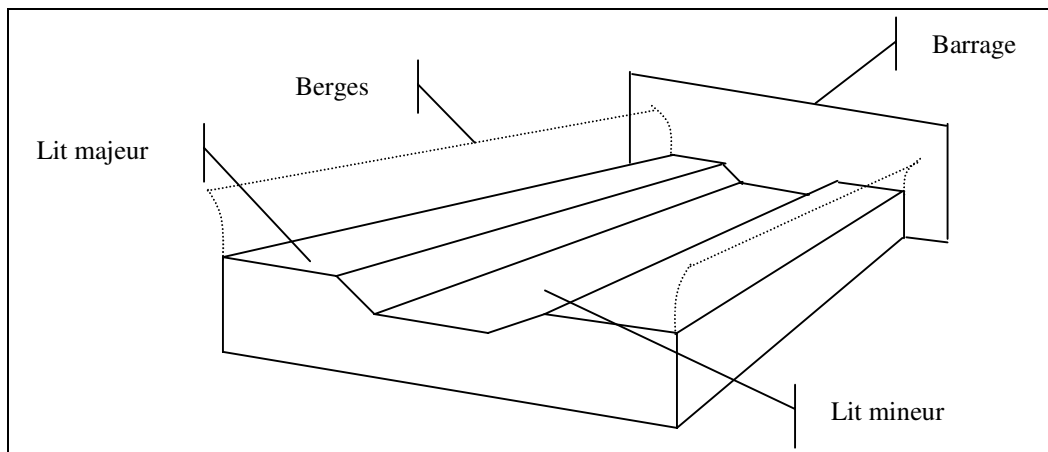


Figure 5-1 : zone de dépôt avec lits mineur et majeur

Pour résoudre le problème de la grosse crue, mentionnons pour mémoire le choix que nous avons testé d'une pente initiale proche de la pente d'équilibre. Dans ce cas, le débit solide en sortie intervient très rapidement puisque le stockage est très faible : on ne répond plus alors à la première fonction de la plage de dépôt qui est justement de stocker.

Une autre idée consiste à stocker artificiellement un volume de matériaux à l'immédiat amont de l'ouvrage terminal ce qui crée une contre-pente : on assiste alors à une reprise de ces matériaux, sans doute délicate à gérer, pendant qu'un stockage s'opère à l'amont de la zone de dépôt.

Enfin il ne faut pas oublier la combinaison de la plage de dépôt avec un bassin écrêteur de crue situé à l'aval. Mais il revient alors peut-être moins cher de rendre le chenal aval à fond fixe c'est-à-dire bétonné jusqu'à l'exutoire et dans ce cas nous nous éloignons de notre sujet.

5.2 Type d'ouvrage aval

Dans le cas de la grosse crue, c'est sans doute une combinaison de modelé de plage et d'ouvrage terminal adapté qui peut laisser entrevoir une solution.

En ce qui concerne l'ouvrage aval, L'idée consiste à trouver une forme qui maintienne la hauteur d'eau très faible tant que le front solide n'a pas atteint l'ouvrage. A ce moment, la hauteur d'eau doit s'élever rapidement ce qui permettrait de continuer à stocker tout en ayant déjà une aspiration du matériau solide.

Une triple fente a été conçue dans ce sens. Il s'agit d'une fente centrale de 3,6 cm encadrée par deux fentes de 3 cm, Les deux fentes du bord étant équipées de grilles. Ces fentes sont destinées à se boucher en augmentant la ligne d'eau et par conséquent le stockage, A terme, seule la fente centrale de 3,6 cm de large fonctionne normalement et se comporte finalement comme une fente unique. Il s'agit donc de passer d'un comportement de fente de 10 cm de large à un comportement de fente de 3,6 cm de large.

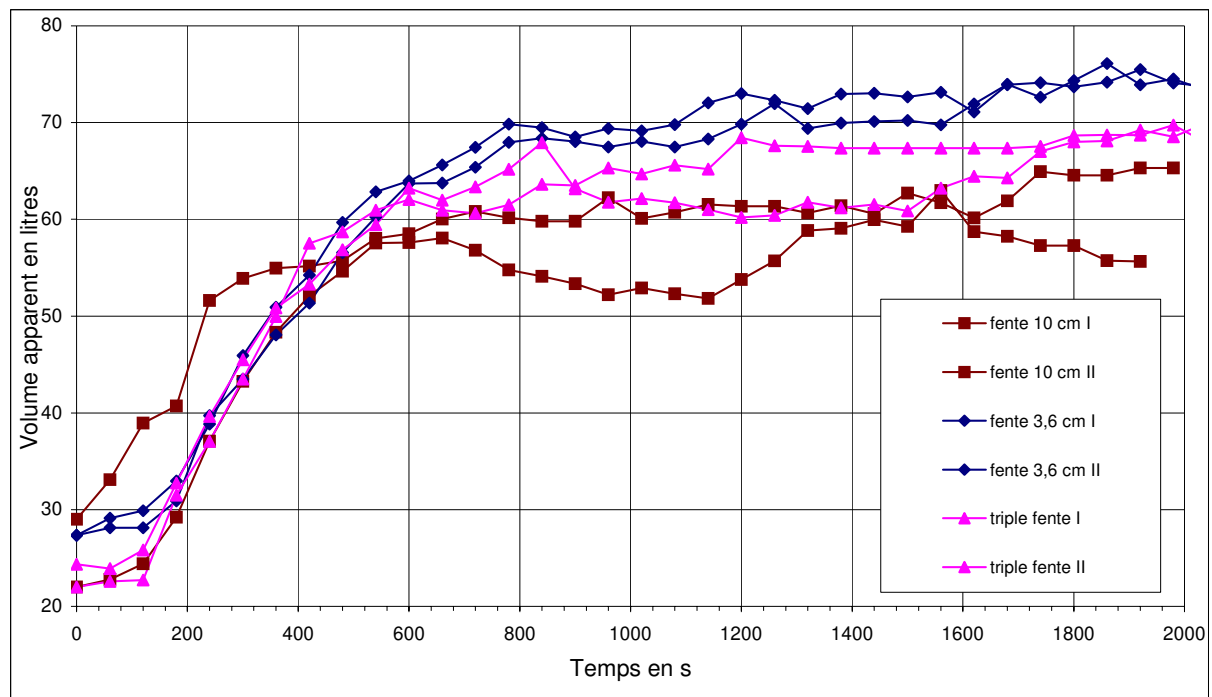


Figure 5-2 : Volume apparent de la « triple fente »

Il apparaît sur la Figure 5-2 que le volume de stockage est intermédiaire entre la fente de 3,6 et 10 cm. Nous avons également observé que le début de débit solide apparaît plus tôt que pour la fente de 3,6 cm et un peu plus tard que pour celle de 10 cm. L'évolution de cet ouvrage va dans le sens souhaité même si la différence avec la fente unique est faible.

Nous proposons pour l'avenir un ouvrage au comportement moins progressif du point de vue hydraulique. Ce type d'ouvrage doit permettre un remplissage le plus rapide possible de la plage tout en permettant ensuite un stockage maximal par élévation du niveau d'eau (Figure 5-3).

La fente centrale et les deux fentes latérales doivent rendre l'ouvrage pratiquement transparent jusqu'à l'arrivée du solide. A partir de ce moment, les deux fentes latérales se

bouchent grâce aux grilles (espacement $< 1,5 D_{98}$) et le niveau d'eau augmente rapidement, La largeur de la fente centrale doit alors être minimale afin d'engendrer un maximum de perte de charge lors du disfonctionnement des fentes latérales. La forme trapézoïdale inverse de la fente doit permettre une élévation encore plus rapide mais non instantanée du niveau d'eau afin de conserver du débit solide en sortie.

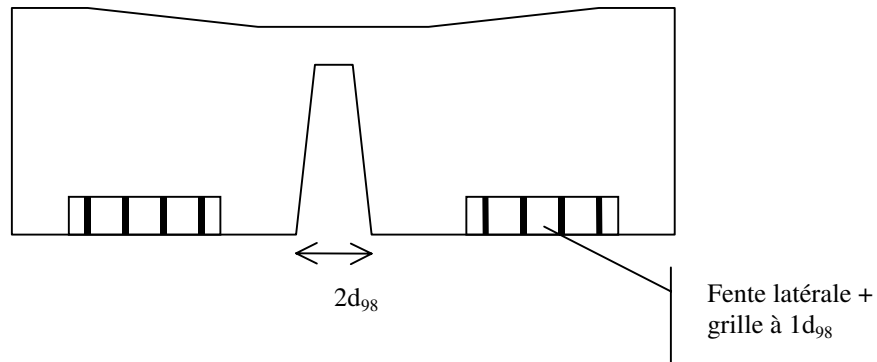


Figure 5-3 : schéma « triple fente » à tester

L'ensemble de ces idées de modélé de plage et de type d'ouvrage devrait fonder un nouveau programme de recherche sur le sujet

5.3 Problème des flottants

Les flottants constituent une contrainte supplémentaire notamment pour les plages de faible dimension. En règle générale, les flottants posent problème aux ouvrages de franchissement aval. Il faut donc les arrêter en amont de ces ouvrages. Dans notre cas, il faudrait trouver un système d'arrêt soit à l'amont ou dans la plage de dépôt soit être certain que les flottants puissent passer sans encombre à travers l'ouvrage terminal. Dans ce dernier cas, les flottants seraient pris en charge par des ouvrages spécifiques situés en aval. En aucun cas, les flottants ne devraient boucher l'ouvrage aval de la plage de dépôt ce qui entraînerait ensuite un fonctionnement en surverse.

Ce problème n'a pas été vraiment abordé dans ces expérimentations. Il s'agit d'un problème délicat qui a déjà été largement traité en « eau claire », beaucoup moins en présence de transport solide (voir Interpraevent, 1996). Un problème est la méconnaissance des lois de similitude. Nous avons néanmoins réalisé deux essais qualitatifs avec des brindilles fourchues d'environ 10 cm de long.

Il est surprenant de constater que ces flottants ont tendance à se déposer dans la plage de dépôt. En outre, ils ont tendance à s'accrocher aux réglés de mesure. Cette observation peut donner des idées en matière de « piège » à disposer dans la zone de dépôt. Il faut néanmoins tenir compte des contraintes que cela représenterait pour les opérations de curage.

La plupart des flottants qui parviennent à la fente se présentent dans le sens de la longueur. Il y a blocage lorsque la fourche représentant le houppier présente un encombrement supérieur à la largeur de la fente ou bien lorsque deux flottant se présentent en même temps. En cas d'arrêt des flottants à la fente, le blocage des matériaux intervient assez rapidement.

Rappelons que toutes ces indications ne sont que qualitatives et propres à notre expérience spécifique.

6 Conclusions

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur des modèle réduits correspondant à des ouvrages terminaux de plages de dépôts couramment rencontrés montre un fonctionnement « tout ou rien » avec l'avancée d'un front solide contrôlé par la hauteur d'eau de la « baignoire » jusqu'à atteindre une pente d'équilibre. Ce remplissage est quasiment terminé lorsqu'apparaît le débit solide en sortie qui atteint rapidement sa valeur d'entrée. Aucune plage de dépôt existante ne peut donc être considérée comme « filtrante »

Les pentes d'équilibres obtenues dans la zone de dépôt sont plus élevées que dans un chenal confiné en raison des divagations instables de l'écoulement. Ces pentes dépendent de la concentration amont mais également des conditions hydrauliques et granulométriques. Aucune formulation directement utilisable en ingénierie n'est disponible pour traiter l'écoulement dans la zone de dépôt. Les formules de débit solide usuelles donnent cependant une borne inférieure de la pente d'équilibre.

La hauteur d'eau de la « baignoire » créée par la fente agit directement sur le remplissage de la plage. Au départ, il s'agit de la hauteur en « eau claire » facilement calculable mais lorsque le front solide atteint la fente, cette hauteur d'eau augmente. Là encore aucune formulation évidente n'existe mais la hauteur d'eau claire donne tout de même la borne inférieure.

La plupart de nos essais a été effectuée à débits liquide et solide constants. Les essais avec deux paliers de débit nous ont néanmoins donné une bonne idée du fonctionnement en régime transitoire et nous ont encore plus convaincu de l'importance de la hauteur d'eau.

Le calcul théorique des profils en long au cours du temps et donc le volume final a été proposé avec comme paramètre d'entrée la hauteur d'eau et la pente d'équilibre. Ces considérations devraient servir à terme au dimensionnement des zones de dépôt à l'aide par exemple d'un modèle numérique simplifié. La validation de ce genre de modèle nécessiterait néanmoins la réalisation d'essais avec de vrais hydrogrammes et pas seulement avec des paliers de débits.

La mise en évidence du fonctionnement hydraulique des plages de dépôt nous a permis de proposer différentes pistes pour la conception d'un ouvrage véritablement filtrant. Nous avons distingués deux problèmes sensiblement différents :

- l'accumulation dans la plage des charges solides apportées par des petites crues qui pourraient transiter sans dommage à l'aval ;

- L'événement catastrophique de faible fréquence qui remplit en une fois la plage de dépôt et fournit à l'aval un débit liquide considérable susceptible de provoquer de graves dommages.

Nous pensons que le premier problème peut être résolu en assurant la continuité hydraulique pour les faibles crues. La réalisation d'un lit mineur dans la zone de dépôt ou la conception d'une plage de dépôt latérale semblent prometteuses mais demandent encore à être testée quantitativement.

Pour traiter la crue intense, problème le plus important à notre sens, il n'est pas évident d'identifier un ouvrage terminal miracle : il faut sans doute agir de concert sur la forme, le modelé de la zone de dépôt ainsi que sur l'ouvrage terminal proprement dit. En s'inspirant des résultats obtenus sur un ouvrage à trois fente, nous avons néanmoins proposé un type d'ouvrage à tester dans le futur.

Pour terminer, l'obtention de véritables règles de dimensionnement passe certainement par une étude des plages de dépôt couplée à l'hydrologie du bassin versant. C'est en effet le couplage d'un hydrogramme (réel ou synthétique) avec une forme de plage et un ouvrage terminal adapté qui doit permettre une réponse adéquate. Une étude statistique à partir de séries temporelles pourraient donner des indications intéressantes comme cela a été fait dans le cas des bassins d'écrêtement de crue.

7 Références

Alexandre Ph.(1997) *Modélisation numérique de l'évolution du lit des torrents*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble, 177 p. + annexes.

Cavinato A., Fistarol A., Fornari E., Piccoli G. (1996) *Control of sediment hydrograph by means of weir with vertical opening*, INTERPRAEVENT 1996, Garmisch-Partenkirchen, tome 5, 99-108.

Chitale S.V., Sinha S., Mishra P.K. (1998) *Estimation of delta profile in the Indravati reservoir*. J. of Hydr Eng, ASCE, Vol. 124, No.1, 109-113.

Deymier C., Tacnet J.M., Mathys N. (1995). *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle*. Col. Etudes Cemagref, EEE No.18.

EROSLOPE (1996) *Slope instability, erosion and solid material transport in steep mountain catchment* European Community Programme Environment and Climate, contrat EV5V0179.

Hotchkiss R. H., Parker G. (1991) *Shock fitting of aggradational profiles due to backwater*. J of Hydr. Eng, ASCE, Vol. 117, No.9, 1129-1144.

Ishikawa Y., Osanai N., Koizumi Y., Takezaki, Matsumura K. (1996) *A method of planning and designing sediment retarding basins* INTERPRAEVENT 1996, Garmisch-Partenkirchen, tome 4, 5-14.

Ishikawa Y. et Mizuyama T.(1988)-*An experimental study on permeable sediment control dams as a countermeasure against floating logs*-6th Congress Asian and Pacific Regional Div. International Association for Hydraulic Research, Kyoto, Japon 20-22 juillet 1988. 723-730.

Ikeya H. (1985) *Study on sediment control effect of open dams* International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Sept. 3-5, 1985, Tsukuba, Japon

Kouliniski V. (1994) *Etude de la Formation d'un lit torrentiel* –Coll Etudes, Ed. Cemagref.

Lala Rakotoson S. J. (1994) *Etude de l'influence de la largeur disponible à l'écoulement sur le charriage torrentiel*. Mémoire DEA MMGE UJF Grenoble, Cemagref. 38 p.+ annexes

Lefort P. (1996) *Transports solides dans le lit des cours d'eau*. Cours INPG

Meunier M. (1991) *Elément d'hydraulique torrentielle* Coll. Etudes, Montagne No.1. Ed. Cemagref.

Mizuyama T., Kobashi S., Mizuno H. (1996)-*Development and improvement of open dams*-INTERPRAEVENT 1996, Garmisch-Partenkirchen, tome 5, 59-65.

Mizuyama T. , Abe S., Ido K. (1988) *Sediment control by sabo dams with slits and/or large drainage conduits*. 6th Congress Asian and Pacific regional div, AIRH, Kyoto, Japon 20-22 juillet 1988. 245-252.

Sogreah (1992) *Etude préliminaire à une recherche expérimentale sur les plages de dépôt torrentiels*.

Smart G.M. et Jaeggi M. (1983) *Sediment transport on steep slopes*. Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie er Eidgenoessischen Technischen Hochschule, No.64.

Tannou S. (1999) *Interactions écoulements torrentiels – ouvrages terminaux de plages de dépôt*. Mémoire de stage INSA Lyon, Décembre 1999.

Wildbach und Lawinenverbau (1998) 62 Jahrgang, No. 136: numéro consacré aux plages de dépôt dans la région de Salzbourg, Autriche.

Yalin M.S (1977) *Mechanics of sediment transport* Pergamon Press.

Zollinger F. (1986) *Les plages de dépôt dans les Alpes Européennes* -traduction en français
RTM-CEMAGREF

Zollinger F. (1984) *Wildbachsperren : Klassifikation und Definitionen* Wildbach und lawinenverbau.